



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHA-MATTI HEIKKINEN
PUTKENTAIVUTUSSOLUN PROSESSINAIKAINEN LAADUNMÄÄ-
RITYS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Minna Lanz
Ohjaaja: Ville Toivonen
Dekaani on hyväksynyt aiheen
2.5.2018

TIIVISTELMÄ

Juha-Matti Heikkinen: Putkentaivutussolun prosessinaikainen laadunmäärittäminen
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 82 sivua, 4 liitesivua
Toukokuu 2018
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: tuotantotekniikka
Tarkastaja: professori Minna Lanz

Avainsanat: putkentaivutus, laadunmäärittäminen, prosessinaikainen, prosessinohjaus, gage R&R, koordinaattimittaus

Tuotteiden oikea-aikainen ja riittävä laadunvarmistus on yksi tärkeimmistä edellytyksistä menestyksekkään yritystoiminnan mahdollistamiseksi valmistavassa teollisuudessa. Hukka, tuotteiden korjaus ja laatupoikkeamat ovat tekijöitä, joiden määrä jokaisessa valmistusprosessissa tulee minimoida. Tässä diplomityössä tutkitaan kohdeyrityksen ydinvalmistusprosessin ja nykyisen valmistusprosessin jälkeisen laadunvarmistusmenetelmän suorituskykyä sekä kartoitetaan teknologisia menetelmiä kehittää laadunvarmistusta prosessinaikaiseksi.

Työn teoriaosuudessa käsitellään valmistustekniikoita, laaduntuoton teoriaa, laadunvarmistusteknologiaa, tilastollista prosessinohjausta ja investointipäätöksenteon teoriaa. Teoriaosuuden avulla tuodaan esiin työkaluja, joilla tulkitaan ja mitataan ydinprosessin laaduntuottokykyä sekä selvitetään potentiaalisia, taloudellisesti perusteltuja menetelmiä ydinprosessin laadunvalvonnan tukemiseksi. Työn tutkimusosuudessa perehdytään nykyisten laadunvarmistusmenetelmien ja ydinprosessin suorituskykyyn sekä kartoitetaan teknologioita laadunvarmistuksen kehittämiseksi. Tutkimusosuudessa lasketaan myös kehitysehdotusten kannattavuus ja tehdään perusteltu painotettu vertailu vaihtoehtoisten menetelmien välillä.

Työn tutkimusosuuden avulla päästiin ensimmäisen kerran todentamaan yrityksen laadunvarmistusmenetelmien kyvykkyys haastavien monimuotoisten kappaleiden mittauksessa ja havaittiin selviä kehitystarpeita mittausmenetelmien toteuttamisessa. Ydinprosessin päävalmistusmenetelmien laaduntuottokyvystä ja valmistusprosessin käyttäytymisestä saatiin huomattava määrä lisätietoa ja löydettiin tekijöitä, joilla on korrelaatio prosessin vaihteluun. Näihin kehityskohteisiin voidaan puuttua ydinprosessin jatkokehityksen yhteydessä. Prosessinaikaisen laadunvarmistusteknologian kyvykkyyydestä ja kustannuksista saatiin yksityiskohtaista tietoa, jota käytettiin osana painotettua teknologiaverailua. Kustannuslaskelmien ja vertailun perusteella pystytään tekemään strategisia perusteltuja päätöksiä ydinprosessin prosessinaikaisen laadunmäärittäksen jatkokehityksen osalta.

ABSTRACT

Juha-Matti Heikkinen: Online quality assay for a tube bending cell

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 82 pages, 4 Appendix pages

May 2018

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Production Technology

Examiner: Professor Minna Lanz

Keywords: pipe bending, determining quality, online, process control, gage R&R, coordinate measuring

The timely and adequate quality assurance of products is one of the most important pre-conditions for successful business operations in the manufacturing industry. Loss, re-work and quality deviations are factors that need to be minimised during every manufacturing process. This thesis examines the performance of the target company's core manufacturing process and existing offline quality assurance methods, as well as identifying technological methods for developing quality assurance online.

The theoretical part of the thesis deals with manufacturing techniques, quality theory, quality assurance technology, statistical process control and investment decision-making theory. The theoretical part will highlight the tools used to interpret and measure the quality of the core process, as well as exploring potential, economically justified methods to support the quality control of the core process. In the research part of the thesis, current quality assurance methods and core process performance efficiency are studied and technologies to develop quality assurance are surveyed. The research section also calculates the profitability of development proposals and makes a justified weighted comparison between alternative methods.

Based on the research findings, the company's quality assurance methods for the measurement of challenging complex items were verified for the first time and it was clearly evident that there were development needs in the implementation of measurement methods. There was a considerable amount of additional information discovered concerning the quality of the main production methods within the core process, as well as concerning the nature of the manufacturing process, and factors also became evident that correlate to fluctuation in the process. These development targets can be addressed by the further development of measures in the core process. Detailed information was found about the capability and cost of online quality assurance technology, which was used as part of a weighted technology comparison. Based on cost calculations and a cost comparison, strategic, reasoned decisions can be made regarding the further development of the online quality assurance of the core process.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty työsuhteen ohessa Kauhavalla toimivalle MSK Cabinsille. Työssä tutkitaan kohdeyrityksen ydinvalmistusprosessin ja nykyisen laadunvarmistusmenetelmän suorituskkyä sekä kartoitetaan teknologisia menetelmiä kehittää laadunvarmistusta prosessinaikaiseksi.

Työn ohjaajana on yrityksen puolelta toiminut Taneli Mikkola, jolta olen saanut erinomaisia neuvoja ja kehitysehdotuksia työn toteuttamiseen. Työn tarkastaja professori Minna Lanz ja ohjaaja Ville Toivonen ovat tukeneet työn edistymistä ammattitaitoisella osaamisellaan. Kiitos kuuluu myös yrityksen putkentaivutus- ja laatuosaston työntekijöille, jotka ovat mahdollistaneet työn kokeellisen osan toteuttamisen.

Erityiskiitokset haluan osoittaa perheenjäsenilleni, joiden kärsivällisyys, tuki ja ymmärrys ovat mahdollistaneet viime vuosien opiskelun töiden ohessa. Ilman teidän tukeanne tämä saavutus ei olisi ollut mahdollinen.

Seinäjoella 22.5.2018

Juha-Matti Heikkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Tutkimustehtävä, työn tavoitteet ja rajaus	1
1.3	Työssä käytettävät tutkimusmenetelmät	2
1.4	Työn tekniset rajoitteet	3
2	TEORIA	4
2.1	Profiiliputken jalostusmenetelmät	4
2.1.1	Putken taivutus	4
2.1.2	Pyörösahaus	6
2.1.3	Robotisoitu koneistus ja poraus	7
2.2	Laadunvarmistus	7
2.2.1	Laatu	7
2.2.2	Suunnittelulaatu	8
2.2.3	Laatukustannukset	9
2.3	Mittausvirheet ja mittausepävarmuus	11
2.3.1	Mittausvirheet	11
2.3.2	Mittausepävarmuus	11
2.3.3	Mittausepävarmuuden laskeminen Gage R&R -menetelmällä	14
2.4	Koordinaattimittaus	18
2.4.1	Koordinaattimittauskone	20
2.4.2	Nivelvarsikoordinaattimittauskone	21
2.4.3	Laserkolmiomittaus	21
2.4.4	Lentoaika- ja vaihe-eromenetelmä	22
2.4.5	Strukturoitu valo	23
2.4.6	Muoto varjosta	23
2.4.7	Interferometria	24
2.4.8	Muoto varjostuksesta	25
2.4.9	Stereokuvaus	26
2.4.10	Muoto tekstuurista	26
2.4.11	Fotogrammetria	27
2.4.12	Muoto terävyydestä	29
2.5	Prosessinohjaus	30
2.5.1	Tilastollinen prosessinohjaus	30
2.5.2	Prosessin suorituskyky	34
2.5.3	Valvontakortit	35
2.6	Investoinnit ja päätöksenteko	39
2.6.1	Investointilaskelmat	39
2.6.2	Analyttinen hierarkiaprosessi	40
3	MITTAUSMENETELMIEN JA -TULOSTEN ESITTELY	43
3.1	Mitattava kappale	43

3.2	Käytössä olevan mittausmenetelmän mittausepävarmuuden todentaminen	44
3.3	Tilastollisen prosessinohjauksen soveltaminen valmistusprosessin osaprosesseihin	48
3.3.1	Kappaleen pituuden mittautulokset	49
3.3.2	Kappaleen taivutuksen mittautulokset.....	52
3.3.3	Kappaleen koneistuksen Z-akselin mittautulokset	55
3.3.4	Kappaleen koneistuksen Y-akselin mittautulokset.....	57
3.4	Valmistusprosessin osaprosessien suorituskyky	60
3.4.1	Sahauksen suorituskyky, mitta 1	61
3.4.2	Taivutuksen suorituskyky, mitta 4	62
3.4.3	Koneistuksen suorituskyky, Z-akseli, mitta 5	62
3.4.4	Koneistuksen suorituskyky, Y-akseli, mitta 6	63
3.5	Prosessinaikaisten mittausjärjestelmien kartoitus	63
3.5.1	Kartoitettavien järjestelmien valinta	63
3.5.2	Kartoitettujen mittausjärjestelmien toimintaperiaatteet	64
3.5.3	Kartoitettujen mittausjärjestelmien arviointiperusteet	64
3.5.4	Kartoitettujen mittausjärjestelmien suorituskyky	65
3.5.5	Kartoitettujen mittausjärjestelmien kannattavuus	66
3.5.6	Kartoitettujen mittausjärjestelmien vertailu AHP-menetelmällä ...	68
4	LOPPUPÄÄTELMÄT	70
4.1	Tulosten arviointi	70
4.1.1	Käytössä olevan mittausmenetelmän mittausepävarmuus.....	70
4.1.2	Valmistusprosessin osaprosessien tilastollinen prosessinohjaus ...	71
4.1.3	Valmistusprosessin osaprosessien suorituskyky	73
4.1.4	Prosessinaikaisten mittausjärjestelmien kartoitus	73
4.1.5	Työssä saatujen tulosten luotettavuus	74
4.1.6	Työssä saatujen tulosten yleistettävyys.....	75
4.2	Jatkotoimenpiteet	75
4.2.1	Prosessin kehittämisen vaihtoehdot ja toimintatavat	75
4.2.2	Valmistusprosessin kehittäminen prosessinaikaisen mittausjärjestelmän investoinnilla.....	75
4.2.3	Valmistusprosessin kehittäminen ilman mittalaitteinvestointia.....	76
4.2.4	Valmistettavien kappaleiden suunnittelulaatu	76
5	YHTEENVETO	78
	LÄHTEET	79

LIITE A: VALMISTUSSOLUN LAYOUT

LIITE B: GAGE R&R- JA MR-KORTIN LASKENNAN KERTOIMET

LIITE C: FARO TITANIUM -NIVELVARSIKOORDINAATTIMITTAUSKONEEN KALIBROINTITODISTUS

LIITE D: AHP-MENETELMÄN LASKENTATAULUKOT

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1.1</i>	<i>Työn rakenne</i>	2
<i>Kuva 2.1</i>	<i>Putken vapaataivutuksen toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [4]</i>	5
<i>Kuva 2.2</i>	<i>Pyörösahan terän geometria, perustuu lähteeseen [7]</i>	6
<i>Kuva 2.3</i>	<i>Laatukustannusten erittely, perustuu lähteeseen [11]</i>	9
<i>Kuva 2.4</i>	<i>Laatukustannusten optimointi [11]</i>	10
<i>Kuva 2.5</i>	<i>3D-koordinaattimittausmenetelmien jaottelu, perustuu lähteeseen [19]</i>	19
<i>Kuva 2.6</i>	<i>Koordinaattimittauskoneen liikeradat ja kappalekoordinaatisto [22]</i>	20
<i>Kuva 2.7</i>	<i>Pisteperusteinen laserkolmiomittaus, perustuu lähteeseen [25]</i>	22
<i>Kuva 2.8</i>	<i>Lentoaika- ja vaihe-eromenetelmän periaatekuva, perustuu lähteeseen [19]</i>	23
<i>Kuva 2.9</i>	<i>Strukturoidun valon menetelmän toimintaperiaate [26]</i>	23
<i>Kuva 2.10</i>	<i>Interferometrin toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [25]</i>	24
<i>Kuva 2.11</i>	<i>Muoto varjostuksesta -prosessi, perustuu lähteeseen [30]</i>	25
<i>Kuva 2.12</i>	<i>Valaistuksen ja kuvauskulman välinen suhde pinnan normaalin nähden, perustuu lähteeseen [30]</i>	25
<i>Kuva 2.13</i>	<i>Stereokuvausjärjestelmän toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [31]</i>	26
<i>Kuva 2.14</i>	<i>Muoto tekstuurista – vaiheet 2D-kuvasta 3D-geometriaksi [32]</i>	27
<i>Kuva 2.15</i>	<i>Kollineaarisuusehto ja maastovirhe [35]</i>	28
<i>Kuva 2.16</i>	<i>Stereo- ja konvergenttikuvaukset [35]</i>	29
<i>Kuva 2.17</i>	<i>Muoto terävyydestä -menetelmän mittausasetelma, perustuu lähteeseen [36]</i>	29
<i>Kuva 2.18</i>	<i>Prosessin kaavioesitys, perustuu lähteeseen [38]</i>	30
<i>Kuva 2.19</i>	<i>Mittauksetulosten jakautuminen normaalijakaumassa [40]</i>	31
<i>Kuva 2.20</i>	<i>Prosessin kehitysvaiheet, perustuu lähteeseen [38]</i>	32
<i>Kuva 2.21</i>	<i>Valvontakortin graafinen esitys [12]</i>	36
<i>Kuva 2.22</i>	<i>Investoinnin kassavirta [47]</i>	39
<i>Kuva 2.23</i>	<i>Hierarkian rakenne-esimerkki [50]</i>	41
<i>Kuva 3.1</i>	<i>Mitattava kappale, kuvanto edestä</i>	43
<i>Kuva 3.2</i>	<i>Mitattava kappale, kuvanto päältä</i>	43
<i>Kuva 3.3</i>	<i>Taivutetun kappaleen laatupoikkeama, syy-seurausdiagrammi</i>	44
<i>Kuva 3.4</i>	<i>Mittalaiteasettelu</i>	45
<i>Kuva 3.5</i>	<i>Gage R&R, raportti mitta 1, vaihtelun osatekijät</i>	47
<i>Kuva 3.6</i>	<i>Gage R&R, raportti mitta 1, vaihtelun yhteenveto</i>	47
<i>Kuva 3.7</i>	<i>I-MR-kaavio, mitta 1</i>	49
<i>Kuva 3.8</i>	<i>Varianssianalyysi, operaattorit, mitta 1</i>	50
<i>Kuva 3.9</i>	<i>T-testi, materiaalierä, mitta 1</i>	51
<i>Kuva 3.10</i>	<i>Regressioanalyysi, tulosten jakautuminen lämpötilan mukaan, mitta 1</i>	51
<i>Kuva 3.11</i>	<i>Muuttuja-analyysi, muuttujakohtainen vaikutus tuloksiin, mitta 1</i>	52
<i>Kuva 3.12</i>	<i>I-MR kaavio, mitta 4</i>	52
<i>Kuva 3.13</i>	<i>Varianssianalyysi, operaattorit, mitta 4</i>	53

<i>Kuva 3.14 T-testi, materiaalierä, mitta 4</i>	53
<i>Kuva 3.15 Regressioanalyysi, tulosten jakautuminen lämpötilan mukaan, mitta 4</i>	54
<i>Kuva 3.16 Muuttuja-analyysi, muuttujakohtainen vaikutus tuloksiin, mitta 4</i>	54
<i>Kuva 3.17 I-MR-kaavio, mitta 5</i>	55
<i>Kuva 3.18 Varianssianalyysi, operaattorit, mitta 5</i>	56
<i>Kuva 3.19 T-testi, materiaalierä, mitta 5</i>	56
<i>Kuva 3.20 Regressioanalyysi, tulosten jakautuminen lämpötilan mukaan, mitta 5</i>	57
<i>Kuva 3.21 Muuttuja-analyysi, muuttujakohtainen vaikutus tuloksiin, mitta 5</i>	57
<i>Kuva 3.22 I-MR kaavio, mitta 6</i>	58
<i>Kuva 3.23 Varianssianalyysi, operaattorit, mitta 6</i>	59
<i>Kuva 3.24 T-testi, materiaalierä, mitta 6</i>	59
<i>Kuva 3.25 Regressioanalyysi, tulosten jakautuminen lämpötilan mukaan, mitta 6</i>	60
<i>Kuva 3.26 Muuttuja-analyysi, muuttujakohtainen vaikutus tuloksiin, mitta 6</i>	60
<i>Kuva 3.27 Sahausprosessin suorituskyky, mitta 1</i>	61
<i>Kuva 3.28 Taivutusprosessin suorituskyky, mitta 4</i>	62
<i>Kuva 3.29 Koneistusprosessin suorituskyky, Z-akseli, mitta 5</i>	62
<i>Kuva 3.30 Koneistusprosessin suorituskyky, Y-akseli, mitta 6</i>	63

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 3.1</i>	<i>Gage R&R, mitat 1–4, vaihtelun yhteenvedo</i>	<i>48</i>
<i>Taulukko 3.2</i>	<i>Järjestelmien arvosteluparametrit</i>	<i>65</i>
<i>Taulukko 3.3</i>	<i>Mittausjärjestelmien ilmoitettu mittausepävarmuus</i>	<i>66</i>
<i>Taulukko 3.4</i>	<i>Investointiehdotusten kannattavuus</i>	<i>67</i>
<i>Taulukko 3.5</i>	<i>Vertailuparametrien painoarvot.....</i>	<i>68</i>
<i>Taulukko 3.6</i>	<i>Mittausjärjestelmien vertailun loppupisteet.....</i>	<i>69</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	Mittaja yksi
AHP	Analyttinen hierarkiaprosessi
APQP	Engl. advanced product quality planning, ennakoiva tuotelaatu suunnitelma
AV	Uusittavuus
B	Mittaja kaksi
C	Mittaja kolme
CAD	Engl. computer aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CI	Engl. consistency index, yhdenmukaisuusindeksi
CL	Engl. centerline, keskilinja
C_m	Maksimisuorituskyky
C_{mk}	Koneen suorituskyky
C_p	Maksimisuorituskyky
C_{pk}	Suorituskyky
CR	Engl. consistency ratio, konsistenssisuhde
EV	Laitevaihtelu
FMEA	Engl. Failure Mode and Effect Analysis, vika- ja vaikutusanalyysi
g	Tulo
I	Engl. individual, yksittäinen mittaustulos
k	Epäkeskeisyyden korjauskerroin
k	Yksittäisten arvojen lukumäärä
KMK	Koordinaattimittauskone
Laser	Engl. light amplification by stimulated emission of radiation, laser
LCL	Vaihteluvälien alavalvontaraja
LSL	Alatoleranssiraja
m	Mittaajien lukumäärä
MR	Engl. Moving Range, liukuva vaihteluväli
\overline{MR}	MR-kuvaajan keskiarvo
n	Mitattavien näytteiden lukumäärä
p	Näyte
PPAP	Engl. Production part approval process, tuotanto-osan hyväksymisprosessi
PV	Näytevaihtelu
R	Vaihteluväli
\bar{R}	Vaihteluvälin keskiarvo
$\overline{\bar{R}}$	Vaihteluvälin keskiarvojen keskiarvo
r	Yhden mittajaan mittaussarjojen lukumäärä
RI	Engl. Random Index, satunnaisindeksi
R_p	Keskiarvojen vaihteluväli

R&R	Engl. Repeatability and Reproducibility, toistettavuus ja uusittavuus
SPC	Engl. Statistical Process Control, tilastollinen prosessinohjaus
T	Toleranssi
T	Prosessin tavoitekeskiarvo
t	Mittaussarja
TV	Kokonaisvaihtelu
UCL	Vaihteluvälien ylävalvontaraja
USL	Ylätoleranssiraja
w	Painoarvo
X	X-koordinaatti
$\bar{\bar{X}}$	Mittaajien mittaussarjojen kokonaiskeskiarvo
x	Mittaustulos
\bar{x}	Mittaustulosten keskiarvo
$\bar{\bar{x}}$	Mittaustulosten keskiarvojen keskiarvo
\bar{X}_{DIFF}	Mittaajien keskiarvojen vaihteluväli
Y	Y-koordinaatti
Z	Z-koordinaatti
λ_{max}	Matriisin suurin reaalinen ominaisarvo
σ	Sigma, perusjoukon keskihajonta, standardipoikkeama
$\hat{\sigma}$	Hajonnan laskettu arvio
$\hat{\sigma}_t$	Prosessin hajonnan estimaatti
σ^2	Varianssi
μ	Perusjoukon keskiarvo
2D	Engl. two-dimensional, kaksiulotteinen
3D	Engl. three-dimensional, kolmiulotteinen

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Tämä diplomityö on tehty MSK Cabinsille, joka on työkoneiden ohjaamoiden ja turvaohjaamoiden sopimusvalmistaja. MSK Cabins on osa perheomisteista MSK Groupia, jonka toimipisteet ovat Suomessa, Saksassa ja Slovakiassa. Automatisoitu putkentaivutus on jo vuosia ollut yksi yrityksen ydinprosesseista ja erittäin tärkeä osa ohjaamoiden runkovalmistusta. Vuosien aikana putkien valmistusta on tutkittu ja kehitetty useissa eri kehitysprojekteissa.

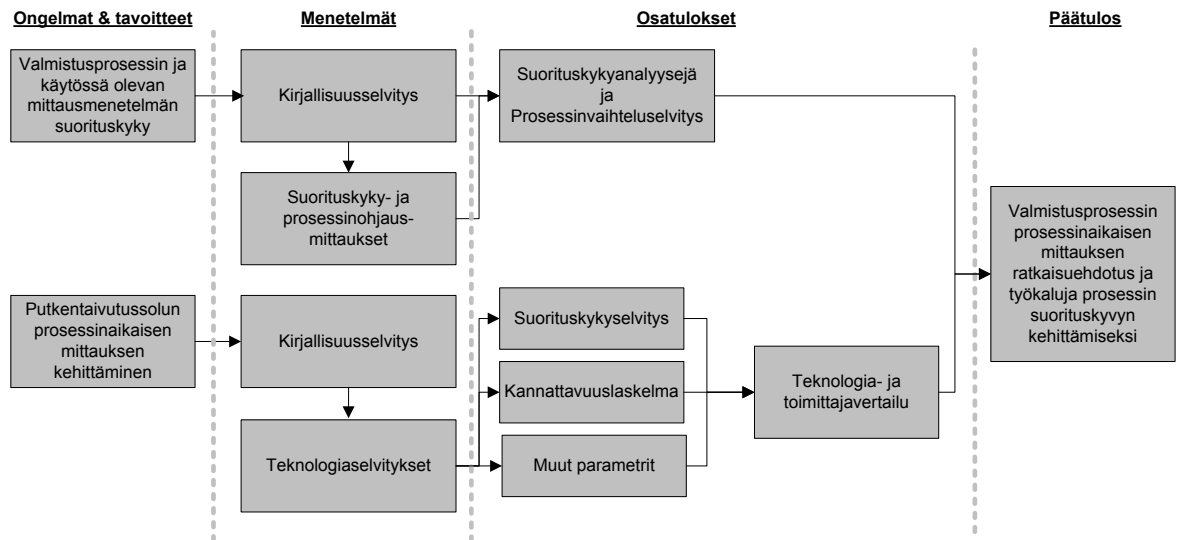
Taivutettujen runkoputkien merkitys ohjaamorungon valmistuksessa on suuri, ja taivutetuilta komponenteilta odotetaan korkeaa laatua, jotta runkovalmistus onnistuu suunnitellusti ilman laatupoikkeamia. Koska runkoputkien valmistus on monivaiheinen prosessi, vaaditaan prosessin ohjaukselta ja valvonnalta korkeaa ammattitaitoa, jotta kaikki valmistusprosessin osat alueet toimivat vaaditusti. Uusien tuotteiden myötä myös putkivalmistuksen kapasiteettitarve on kasvanut ja komponenttien läpimenoaikaan sekä solun saantiin on kiinnitetty entistä enemmän huomiota.

Suurimmaksi haasteeksi runkoputkien valmistuksessa on noussut prosessin valvonta, koska valmistussoluun rakennettu automaattinen mittauslaite ei ole toiminut luotettavasti eikä vastaa ominaisuuksiltaan enää nykyisin vaadittavaa tasoa. Laadunvalvontaa suoritetaan nykyisin valmistusprosessin jälkeen koetintulkkien ja koordinaattimittauksen avulla. Kappaleiden tulkkauksesta saatu laadullinen palaute tulee kuitenkin prosessin ohjausmielessä liian myöhään, mikä lisää epäkurantin tuotannon riskiä. Valmistussolun kappaleiden mittausmenetelmää halutaan kuitenkin kehittää siten, että se on valmistusprosessin valvonnan kannalta oikea-aikainen, riittävän nopea, tuloksiltaan luotettava ja riittävän joustavaa palvelemaan laajaa tuotesortimenttia. Mittausmenetelmän täytyy tukea operaattorin reaaliaikaisesta prosessinvalvontaa ja mahdollistaa myös pitkäaikainen valmistusprosessin seuranta.

1.2 Tutkimustehtävä, työn tavoitteet ja rajaus

Tässä diplomityössä tutkitaan turvaohjaamon rungon profiiliputkien laadunvarmistusmenetelmän ja valmistusprosessin kyvykkyyttä sekä kartoitetaan teknologisia menetelmiä laadunvarmistuksen kehittämiseksi. Työn tavoite on kaksiosainen kuvan 1.1 mukaisesti. Ensimmäisessä vaiheessa tavoitteena on selvittää nykyisen putkien mittausmenetelmän sekä valmistusprosessin soveltuvuus ja kyvykkyys valmistettujen kappaleiden valmistukseen ja laadunvarmistukseen. Toisessa vaiheessa tavoitteena on löytää luotettava ja kustannustehokas mittausmenetelmä solulta valmistuvien kappaleiden prosessinaikaiseen eli reaaliaikaiseen laadunvalvontaan, jonka avulla valmistusprosessia voidaan säätää luotettavasti ja

putkien valmistuksen kokonaiskustannuksia voidaan vähentää nykyisestä. Yhdistämällä nämä tulokset saadaan käsitys valmistusprosessin kyvystä tuottaa vaatimusten mukaisia kappaleita ja laadunvarmistuksen kyvystä todentaa tuotteiden laatu. Lisäksi saadaan perusteltuja menetelmävaihtoehtoja prosessin reaaliaikaiseen valvontaan ja ohjaukseen. Selvitystyön mahdollistamiseksi työssä tutustutaan valmistusmenetelmien, mittausmenetelmien, tuotelaadun, prosessinohjauksen ja teollisten investointien teoriaan.



Kuva 1.1 Työn rakenne

Työ rajataan kirjallisuustutkimukseen, mittauksen ja prosessin nykytilan selvitystyöhön sekä potentiaalisen reaaliaikaisen mittausteknologian kartoittamiseen olemassa olevien teknisten ja taloudellisten resurssien rajoissa. Tässä työssä ei lähtökohtaisesti pyritä kehittämään nykyistä mittausmenetelmää tai valmistusprosessin kyvykkyyttä paremman lopputuotteen valmistamiseksi.

1.3 Työssä käytettävät tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa käytetään sen prosessimaisen luonteen vuoksi kvantitatiivisia tutkimusmenetelmiä. Taivutettujen putkien valmistusmenetelmien toimintaperiaatteisiin ja kohteeseen soveltuviin laadunvarmistusmenetelmiin tutustutaan kirjallisuustutkimuksella. Nykyisen laadunvarmistusmenetelmän ja valmistusprosessin laaduntuottokyvyn analysointia varten tuotetaan aineistoa systemaattisella näyteprosessilla ennalta määritellystä tuotantonimikkeestä. Aineiston analysointiin hyödynnetään Gage R&R- (engl. Repeatability and Reproducibility, toistettavuus ja uusittavuus) ja SPC-menetelmiä (engl. Statistical Process Control, tilastollinen prosessinohjaus).

Laitteiston valinnan pohjaksi määritetään tärkeimmät metrologiset arvot, jotka laitteiston tulee täyttää. Määrityksen jälkeen mittalaittevalmistajien tuotteisiin tutustutaan käytännössä sekä selvitetään mittausteknologioiden soveltuvuus valmistussolun käyttöolosuhteisiin ja kapasiteettivaatimuksiin.

Järjestelmätoimittajilta saatujen tietojen pohjalta laaditaan investoinnin kannattavuuslaskelma valitulla investointilaskelmamenetelmällä. Lisäksi tutkitaan laatukustannusten vaikutusta menetelmän kannattavuuteen. Kerätyn aineiston pohjalta tehdään analyysi, jonka avulla eri vaihtoehdot voidaan pisteyttää. Laitteiston vertailuun ja valintaan käytetään AHP-menetelmää (analyyttinen hierarkiaprosessi).

1.4 Työn tekniset rajoitteet

Työlle teknisiä rajoitteita asettaa nykyisen valmistussolun toimilaitteiden sijoittelu. Koska nykyinen valmistussolu on toimiva kokonaisuus, ei solun layoutia haluta muuttaa. Uuden prosessinaikaisen mittausjärjestelmän tulee soveltua teknisesti käytöstä poistetun mittausjärjestelmän tilalle, eikä solun virtaus saa muutoksista häiriintyä. Järjestelmän täytyy soveltua myös kaikkien nykyisten valmistettavien kappaleiden mittaukseen, mikä osaltaan määrittää myös mitattavien kappaleiden kompleksisuuden ja järjestelmältä vaaditun vähimmäismittausalan. Solun layout on esitelty liitteessä A.

2 TEORIA

2.1 Profiiliputken jalostusmenetelmät

Taivutettujen profiiliputkien jalostus koostuu tässä työssä neljästä päävaiheesta, joissa putkiprofiiliihiota muokataan lopputuotteeksi. Automatisoidut vaiheet ovat taivutus, pyörösahaus, robotisoitu koneistus ja plasmaleikkaus. Lisäksi tuotantovalmiit profiilit tarkastetaan käsityönä koetinmallin eli tulkin avulla. Tässä työssä keskitytään taivutus-, pyörösahaus- ja koneistusvaiheisiin.

2.1.1 Putken taivutus

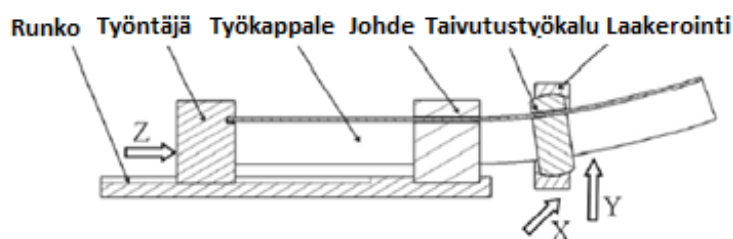
Taivuttaminen on hyvin yleinen valmistusmenetelmä valmistavassa teollisuudessa, etenkin ohutlevyvalmistuksessa. Taivutusta hyödynnetään laajasti myös erilaisten putkiprofiilien jatkojalostuksessa. Ohutlevykappaleiden ja putkien taivuttamisessa on kuitenkin eroja, koska molemmilla menetelmillä on omat erityispiirteensä taivutettavien kappaleiden erilaisten poikkileikkausgeometrioiden vuoksi [1 katso 2, s. 92]. Putken taivutus on kiinteän kappaleen muokkaamista plastisessa tilassa, joka saavutetaan tyypillisesti taivutuskormalla [1 katso 2, s. 92]. Taivutettavat putkiihioiden poikkileikkaukset voivat vaihdella pyöröputkista symmetrisiin ja epäsymmetrisiin muotoihin.

Taivutettujen putkien käyttöä puoltavat laajat sovellusmahdollisuudet, jotka saavutetaan putkiprofiilien monipuolisilla ominaisuuksilla. Profiileita on tarjolla laaja skaala, ja myös räätälöityjä ratkaisuja on saatavissa toimittajilta. Putkien geometria voidaan suunnitella melko vapaasti, mikä vähentää liitoksien tarvetta rakenteissa. Profiileita oikein hyödyntämällä saadaan tuotteista muotoilullisesti kehittyneitä, ergonomisia ja rakenteellisesti jäykkiä mutta samalla myös kevyitä. Rakenteiden keveys parantaa tuotteiden kokonaisenergiatehokkuutta etenkin kuljetusteknisissä sovelluksissa. [1 katso 2, s. 92]

Taivutettavien profiiliihioiden käyttökohde on tyypillisesti tukirakenne, jolloin putken tulee täyttää tiukat laatuvaatimukset niin profiilien muodon kuin mittatarkkuudenkin osalta. Korkeat vaatimukset mahdollistavat myös automaattisen kappaleen käsittelyn sekä automatisoidun liittämistekniikan hyödyntämisen kappaleiden käsittelyssä ja liittämisessä. Kappaleiden taivutusprosessin tulee olla vakaa ja hyvin valvottu, jotta prosessia voidaan säätää muutoksien ilmetessä. Putkentaivutukseen vaikuttaa laaja joukko prosessi- ja profiiliparametreja, jotka hankaloittavat prosessin analysointia ja simulaatiota. Tämä on yksi syy, miksi putkentaivutusprosessin ohjauksessa on tavallisesti matala automaatioaste ja prosessia ohjataan kokemuseräisesti. [1 katso 2, s. 92]

Taivutettujen profiilien suunnittelua ja taivutuksen jälkeisiä valmistusvaiheita hankaloittaa taivutuksen epätarkkuus, joka johtuu taivutetun profiilin, materiaalin ja taivutustyökalujen parametreista. Putken käyttäytymistä taivutuksen aikana on hankala määrittellä tarkasti, koska materiaali on plastisessa tilassa ja profiilissa on valmistusprosessista johtuvia jäännösjännityksiä jo ennen taivutusta. Putken taivutuksen aikana putkeen muodostuu sekä veto- että puristusjännityksiä. Näiden kaikkien muuttujien yhteisvaikutuksesta taivutetut putket ovat epähomogeenisia yksilöitä, joiden keskinäinen vaihtelu on suurta. Myös taivutettavan putkiprofiilin mitoitus ja muoto sekä materiaalin koostumus ovat parametreja, jotka vaikuttavat taivutusprosessiin. Profiilin muodonmuutokset ovat taivutuksessa merkittävä ongelma, etenkin kohteissa, joissa vaaditaan korkeaa laatua ja mittatarkkuutta. Taivutusprosessissa esiintyy aina takaisinjoustoja, jota voidaan kompensoida profiilin ylitaivutuksella, mutta hallittu kompensointi vaatii paljon kokemuseräistä tietoa prosessin ja materiaalin käyttämisestä. [1 katso 2, s. 96]

Putken vapaataivutusmenetelmä on kehitetty 2000-luvulla, ja se soveltuu erityisesti hankalien taivutusgeometrioiden valmistamiseen [3, s. 363]. Menetelmällä voidaan taivuttaa sekä profiili- että pyöröputkia, ja sen etuna on, että sillä voidaan taivuttaa myös vaihtuvasteisiä taivutuksia ilman taivutustyökalujen vaihtoa, mikä lisää merkittävästi joustavuutta taivutusprosessiin. Vapaataivutuksessa minimitaivutussäde on 2,5 kertaa putken ulkohalkaisija ilman taivutustuurnaa. Vapaataivutus perustuu putken taivuttamiseen työntämällä putkiaihio liikuteltavan taivutustyökalun läpi. Putkiaihio syötetään taivutus-koneen Z-akselille, josta putkea työnnetään Z-akselin suuntaisesti taivutustyökalun läpi. Taivutustyökalu liikkuu X- ja Y-akseleiden suuntaisesti, ja näin putkea poikkeutetaan Z-akselilta ja putki alkaa muokkaantua. Taivutustyökalun sijaintia voidaan ohjata portaattomasti taivutuksen aikana, ja siten voidaan vaikuttaa taivutuksen suuntaan ja taivutussäteeseen [4, s. 1–2]. Putken vapaataivutuksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Putken vapaataivutuksen toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [4]

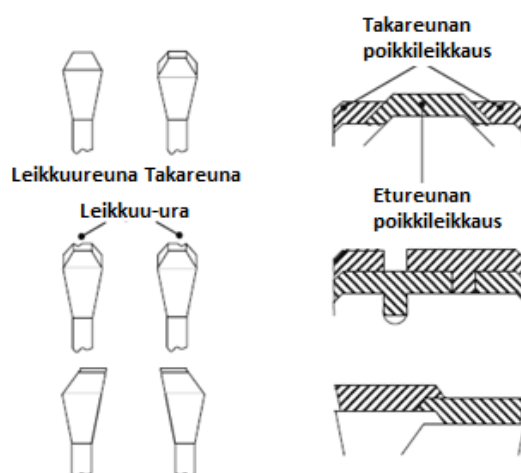
Taivutustyökalulla voi olla myös useampia vapausasteita kuin X, Y ja Z. Markkinoilla on tarjolla taivutuskoneita, joissa on viisi tai kuusi vapausastetta [5]. Tällaisella taivutuskoneella taivutettua putkea voidaan muun muassa kiertää spiraalille.

2.1.2 Pyörösahaus

Sahaamista käytetään yleisesti aihion valmistusmenetelmänä, jota seuraa mittojen ja muotojen viimeistely muilla lastuavilla menetelmillä. Sahausten voi jakaa kolmeen pääkategoriaan terän muodon perusteella: konesahaukseen, vannesahaukseen ja pyörösahaukseen. Pyörösahaus tapahtuu pyöreällä vannekiekolla, jota tavallisesti ohjataan numeerisesti ohjatulla koneella. Pyörivän terän ansiosta sahausjälki on tasainen ja suora. Yleisin terämateriaali on pikateräs, mutta myös kovametallihampailla varustetut terät ovat yleisiä [6, s. 185–187].

Pyörösahausta käytetään tyypillisesti edullisten materiaalien katkaisuun, koska sahausrako on melko leveä ja terän muodostama hukka siten huomattava. Terän runko-osa voi olla yksi- tai useampiosainen terän koon mukaan. Jos runko on yksiosainen, se on tyypillisesti valmistettu teräksestä tai pikateräksestä. Jos terä on kaksiosainen, on rungon sisäosa tyypillisesti rakenneterästä ja ulko-osa pikaterästä. Tällä saavutetaan kustannussäästöt terän valmistuksessa. Terän osat on tyypillisesti kiitattu toisiinsa. [7, s. 442–444]

Terän leikkuun varmistamiseksi täytyy leikkuusta muodostuvan lastun olla kapeampi kuin sahausrako. Muuten terä on vaarassa jumittua ja vaurioitua. Ongelma voidaan ratkaista jakamalla terät esileikkuisiin ja jälkileikkuisiin elementteihin, joiden yksin irrottama lastu on leikkausleveydeltään pienempi kuin terän kokonaisleveys. Toinen vaihtoehto on jyrsiä hampaisiin leikkuu-ura, joka toistuu joka toisessa terässä samalla puolella. Uran avulla lastut voidaan pilkkoa pienemmiksi, ja ne poistuvat leikkausraosta tehokkaasti kokonaisleikkuutehon kärsimättä [7, s. 442–444]. Terän geometriaa on havainnollistettu kuvassa 2.2. Jotta pyörösahan terä olisi vakaa ja toimisi odotetusti, täytyy terä jännittää joko takomalla, valssaamalla tai laserlämmittämällä terän kylkiä [7, s. 442–444].



Kuva 2.2 Pyörösahan terän geometria, perustuu lähteeseen [7]

2.1.3 Robotisoitu koneistus ja poraus

Robotisoidut porausjärjestelmät ovat nopeasti ohjelmoitavia joustavan liikeradan järjestelmiä, joille on helppo tehdä tuotemuutoksia ja jotka palvelevat siten myös hyvin Lean-ajattelumallia [8, s. 1]. Teollisuusrobottien vähäinen staattinen jäykkyys aiheuttaa kuitenkin paikoitusepävarmuutta ja taipumaa koneistustyökaluun. Yleisen käsityksen mukaan robotisoitu koneistus soveltuu pääasiassa vähäistä tarkkuutta vaativiin sovelluksiin, joissa koneeseen kohdistuu pieniä leikkausvoimia [9, s. 1]. Robotisoidun koneistuksen paikoitustarkkuus onkin välillä 0,1–2 mm, mikä johtuu muun muassa robotin ominaisuuksista ja asennosta [10, s. 1].

Robotti on sarjamekanismi, ja sen haittapuolena on rakenteen myötö, joka aiheuttaa koneistussovelluksissa värinää ja epätarkkuutta. Poratessa poratyökaluun kohdistuva suuri työntövoima voi aiheuttaa voimakkaan värähtelyn robotin rakenteessa, johtuen teollisuusrobottien nivelien joustavuudesta. Ongelma voidaan ratkaista kiinnittämällä porauspää automaattisella kiinnittimellä porattavaan kappaleeseen, jolloin sidotaan kaikki muut liikesuunnat paitsi poran lineaarinen liike varren suuntaisesti. Tällaisella ratkaisulla robotin täytyy tuottaa vain porauksen vaatima voima. Menetelmän ansiosta myös robotin porausyksikön värähtelyt vähenevät huomattavasti. Porausyksikössä käytettävän robotin käsittelykyvyn tulisi olla kolme kertaa suurempi kuin robottiin kiinnitettävän porausyksikön massa [8, s. 1].

2.2 Laadunvarmistus

2.2.1 Laatu

Laadun määrittäminen yksiselitteisesti ei ole mahdollista. Laatu voidaan käsittää hyvin eri tavoin eri asiayhteyksissä. Kuitenkin teollisessa tuotannossa on oleellista tunnistaa tuotteen tai palvelun laadulliset seikat ja luoda niistä mitattavia suureita, joita voidaan arvostaa ja arvioida todennettavissa olevilla menetelmillä.

Tuotantoperusteiset laatukriteerit ovat valmistavan teollisuuden näkökulmasta luonnollinen tapa käsittää laatu ja sen mittaaminen. Laatu tulee pystyä mittaamaan ja arvioimaan yksiselitteisesti. Laadulle tulee myös kyetä asettamaan tavoitteita, jotka ovat saavutettavissa ja joihin voidaan toiminnan parantamisella tähdätä [11, s. 19]. Tuotteiden ei tarvitse olla mitoiltaan absoluuttisen tarkkoja, vaan niissä voi olla vaihtelua, joka voidaan sallia tuotteen toiminnallisuuden kärsimättä. Tuotteen valmistuksessa sallitut poikkeamat ovat toleransseja, jotka mahdollistavat vaihtelua valmistusprosessiin. Toleranssien esittäminen tuotteen nimellismitan yhteydessä antaa tuotteen valmistukseen selvät raja-arvot, joiden sisällä tuotantoprosessin täytyy pysyä, jotta valmistettavien kappaleiden yhteensopivuusvaatimus täyttyy [11, s. 20].

Laadun määrittäminen tuotteelle ei yksiselitteisesti tarkoita korkeaa laatua, vaan voidaan puhua toiminnallisesta laadusta, jonka puitteissa tuote toimii oletetusti. Määrittämällä laatu-kriteerit voidaan varmistaa, että tuotteet ovat riittävän yhdenmukaisia ja täyttävät niille asetetut vaatimukset [11, s. 20].

2.2.2 Suunnittelulaatu

Suunnittelulaatu on merkittävä tekijä tuotteen laadukkuutta määritettäessä. Kaikki tuotteet voidaan määritellä täyttämään tiukimmatkin laadulliset kriteerit, mutta se ei ole taloudellisesti mahdollista ja johtaisi ylilaadun tuottamiseen. Suunnittelulaadun tärkeimpiä tehtäviä onkin määrittää tuotteelle riittävä laatutaso, joka on tasapainossa valmistustekniikasta johtuvien valmistuskustannusten ja tuotteen toiminnallisten ominaisuuksien kanssa [11, s. 27]. Suunnittelulaatu ei ole merkitykseltään sama kuin suunnittelun laatu. Suunnittelun laadulla tarkoitetaan tuotteen toiminnallista virheettömyyttä, joka osaltaan myös edistää laadullisesti riittävän tuotteen valmistamista [11, s. 28]. Suunnittelulaadun määrittämiseen ei ole yksiselitteistä menetelmää, vaan jokainen valmistettava tuote on arvioitava erikseen. Tietoa voidaan kerätä erilaisilla tutkimuksilla, ja luonnollisesti aikaisempi kokemus saman tyyppisistä tuotteista sekä valmistustekniikoista helpottaa riittävän laatutason määrittämisessä [11, s. 27].

Tuotteen laatuun vaikuttaa laaja joukko tekijöitä, jotka ovat tuote- ja menetelmäkohtaisia. Fyysisiä tuotteita valmistettaessa vaihtelua muodostuu muun muassa raaka-aineista ja olosuhteista kuten lämpötila ja kosteus, valmistukseen käytettävistä koneista ja laitteista sekä luonnollisesti inhimillisistä tekijöistä. Lisäksi kaikille tuotteille on määritelty valmistukseen liittyvät toleranssit, joiden sisällä tuotteen ominaisuuksissa voi sallituissa rajoissa olla vaihtelua. Toleranssiketjujen hallinta on myös olennainen osa kokoonpanoja ja kokonaisuuksia suunniteltaessa [11, s. 27].

Suunnittelulaadun taso tulee olla riittävä, jotta voidaan välttää tilanteita, joissa tuotteita tai puolivalmisteita joudutaan purkamaan tai korjaamaan. Heikon suunnittelulaadun aiheuttama ylimääräinen työ ja materiaalikustannukset heikentävät tuotteen kannattavuutta. Jos viallisia tuotteita päätyy asiakkaalle asti, aiheutuu taloudellisten kustannusten lisäksi myös yrityksen imagolle vahinkoja, joiden seuraukset voivat olla hyvinkin kauaskantoisia ja vakavia [11, s. 27]. Suunnittelulaadun ja valmistuslaadun erottaminen toisistaan on tärkeää, koska näiden komponenttien merkitys valmistuskustannuksille on huomattava. Korkea suunnittelulaatu tai tuotteiden laadukkuus tarkoittaa yleisesti korkeampia kustannuksia. Korkea valmistuslaatu ja suunnitelmien mukaiset tuotteet tarkoittavat tavallisesti pienempiä kustannuksia [11, s. 27].

2.2.3 Laatukustannukset

Termillä laatukustannus tarkoitetaan virheellisestä tuotannosta aiheutuvaa lisäkustannusta, jota ei ole suunniteltu ja joka on siten ylimääräinen kuluerä tuotteen valmistuksessa. Laatukustannukset muodostuvat monen eri osatekijän summasta. Kaikki teollinen tuotanto, joka ei valmistu suunnitellusti kerralla valmiiksi, luo laatukustannuksia. Tyypillisesti laatukustannuksia muodostuu virheellisesti valmistetun tuotteen korjaamisesta ja virhelähteiden selvittämiseen liittyvästä työstä. Joissain tapauksissa virheellisesti valmistettu tuote ei ole enää korjauskelpoinen ja se joudutaan valmistamaan kokonaan uudestaan, jolloin laatukustannusten osuus tuotteen kokonaiskustannuksista on merkittävä. [11, s. 31 - 32]

Laadusta johtuvia kustannuksia voidaan käyttää laatujärjestelmän mittarina, jota systemaattisesti seuraamalla voidaan havainnoida tuotteiden laadun parantamiseksi tehtyjä toimia [12, s. 312]. Laatukustannusten seuranta ei ole yksiselitteistä, ja siksi hyvin helposti tuotteen todelliset laatukustannukset ovatkin kirjattuja suurempia [11, s. 31]. Laatukustannusten tuotekohtaista tunnistamista ja allokointia hankaloittaa se, että virheellisen tuotteen aiheuttamaa kokonaistyömäärää on vaikea arvioida. Laatuvirheistä aiheutuva välillinen työ, jota organisaation eri tasoilla tapahtuu, jää helposti kohdentamatta laatukustannukseksi, ja siten kirjatut kustannukset eivät vastaa todellisia kustannuksia [12, s. 312]. Laatukustannukset voidaan jakaa virheestä johtuviin laatukustannuksiin ja ennalta ehkäiseviin laatukustannuksiin kuvan 2.3 mukaan.



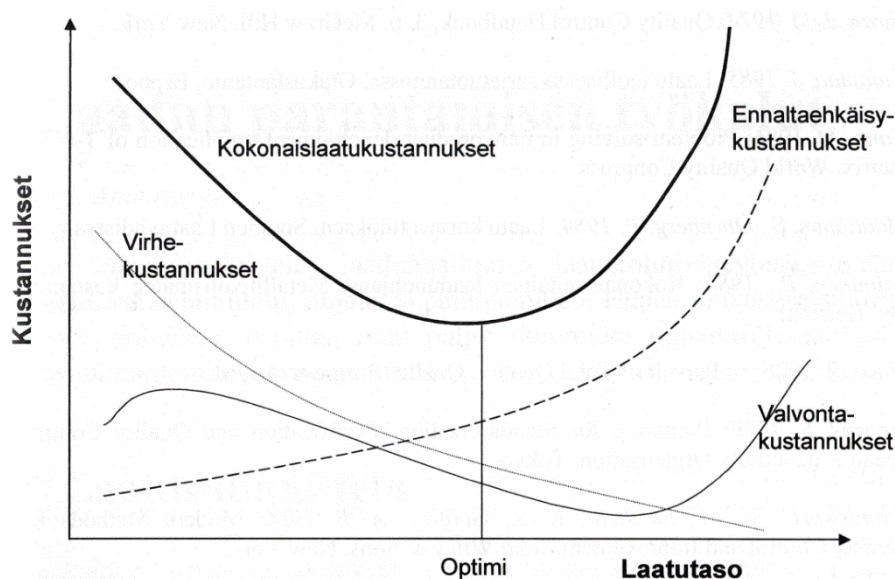
Kuva 2.3 Laatukustannusten erittely, perustuu lähteeseen [11]

Ennaltaehkäisykustannuksia kerryttävät kaikki toimet, joilla pyritään estämään virheellisten tuotteiden syntyminen. Ennalta ehkäiseviä toimia ja niihin liittyviä kustannuksia voidaan pitää myös investointi luontoisina kustannuksina, koska näin ehkäistään virheellisten tuotteiden syntyminen ja niistä aiheutuvat monitahoiset laatukustannukset [12, s. 313].

Valvontakustannukset muodostuvat esimerkiksi prosessien valvonnasta, mittavälineiden ylläpidosta, laadunvalvonnan kustannuksista ja auditoinneista. Auditoinnit voiva olla sekä yrityksen sisäisiä että ulkoisia ja koskea joko yrityksen sisäistä tai toimittajan tuotantoprosessia [12, s. 314]. Valvontakustannukset muodostuvat siis tuoteprosessin osaprosessin, tuoteprosessin tai sen tuottaman tuotteen valvontakustannuksista.

Sisäiset virhekustannukset tarkoittavat yrityksen sisäisistä laatuongelmista johtuvia ylimääräisiä kuluja. Sisäiset kustannukset syntyvät siis ennen kuin tuote on luovutettu asiakkaalle. Kustannuksia aiheuttavat tuotteet, jotka eivät ole vaatimusten mukaisia esimerkiksi suunnittelu- tai valmistusvirheiden vuoksi. Virheellisten tuotteiden korjaaminen vaatii resursseja, kuten työtä ja materiaaleja, joiden käyttäminen aiheuttaa suunnittelemattomia kuluja ja vähentää tuotteesta saatavaa katetta [12, s. 314]. Ulkoiset virhekustannukset muodostuvat tuotteista, jotka on jo toimitettu asiakkaalle mutta jotka eivät täytä asiakasvaatimuksia. Kulut aiheutuvat resursseista, joilla tuote saatetaan vaatimusten mukaiseen tilaan, sekä mahdollisesta haitasta yrityksen maineelle ja siitä johtuvasta kaupan heikentymisestä [12, s. 314].

Kuvan 2.4 mukaisesti laatukustannuksia optimoimalla pyritään tilanteeseen, jossa tuotteen laatu on tasolla, joka täyttää sille asetetut vaatimukset mutta laadun kokonaiskustannukset ovat minimissään. Laadun kokonaiskustannusten optimitaso löytyy virhe-, valvonta- ja ennaltaehkäisykustannusten yhdistelmästä.



Kuva 2.4 Laatukustannusten optimointi [11]

2.3 Mittausvirheet ja mittausepävarmuus

2.3.1 Mittausvirheet

Koska mitään mittausta ei voida suorittaa täysin virheettömästi, on mittausvirheiden vaikutus otettava huomioon mittaustuloksia arvioitaessa. Mittausvirheellä tarkoitetaan havainnoitavan suureen todellisen arvon ja mittaustuloksen arvon erotusta. Useimmissa tapauksissa mittaausvirheelle voidaan antaa arvo toistomittauksien avulla. Mittausvirheet voidaan jakaa karkeisiin, systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin [13, s. 95].

Karkea virhe on selkeä yksittäinen mittaajasta tai mittalaitteesta johtuva virhe. Jos mittaustulokseen epäillään sisältyvän karkea virhe, se voidaan hylätä. Mittaustulosta ei saa kuitenkaan hylätä, mikäli mittaajalla ei ole yksiselitteistä tietoa, mistä poikkeava mittaustulos johtuu [13, s. 95]. Karkeat mittausrvirheet ovat tyypillisesti mittaajalähtöisiä, ja virheen suuruusluokka on tavallisesti moninkertainen systemaattiseen tai satunnaiseen virheeseen nähden [11, s. 130].

Systemaattinen virhe on mittausvirheen osa, joka pysyy mittausta toistettaessa vakiona tai vaihtelee ennustettavalla tavalla. Vertailuarvo, jonka avulla systemaattinen mittausvirhe voidaan määrittää, on sellaisen mittanormaanin mitattu arvo, jonka mittausepävarmuus on merkityksetön tai suureen sovittu arvo. Systemaattinen mittausvirhe ja sen syyt voivat olla tunnettuja tai tuntemattomia. Jos systemaattinen mittausvirhe tunnetaan, se voidaan korjata. Systemaattinen mittausvirhe on mittausvirheen ja satunnaisen mittausvirheen erotus [14, s. 33].

Satunnainen mittausvirhe on mittausvirheen osa, joka vaihtelee ennustamattomalla tavalla mittausta toistettaessa. Suureen vertailuarvo, jolla satunnainen mittausvirhe voidaan määrittää, on keskiarvo, joka saataisiin toistamalla sama mittaussuureen mittaus äärettömän monta kertaa. Toistomittaussarjan satunnaiset mittausvirheet muodostavat jakauman, jonka tunnusuuureita ovat varianssi (σ^2) ja odotusarvo, joka yleensä oletetaan nolllaksi. Satunnainen mittausvirhe on mittausvirheen ja systemaattisen mittausvirheen erotus [14, s. 33].

2.3.2 Mittausepävarmuus

Mittausepävarmuus voidaan määritellä usealla tavalla. Eräs tapa on kuvata mittausepävarmuudella mittaussjärjestelmän suorituskykyä. Kirjallisuudessa mittausepävarmuus esitetään myös mittaustulokseen liittyvänä parametrina, joka kuvaa mittaussuureen arvojen odotettua vaihtelua. Kansainvälisessä metrologisessa sanastossa mittausepävarmuus on ei-negatiivinen parametri, joka käytettyjen tietojen perusteella kuvaa mittaussuureelle saatujen arvojen oletettua vaihtelua. Mittausepävarmuuteen sisältyy systemaattisista vaikutuksista aiheutuvia komponentteja, kuten korjauksiin ja mittanormaaleille annettuihin suureen arvoihin liittyviä epävarmuuskomponentteja, sekä määrittelyepävarmuus. Joskus

arvioituja systemaattisia vaikutuksia ei korjata, vaan niihin liittyvät mittausepävarmuuden komponentit otetaan huomioon mittausepävarmuudessa. Yleensä tietty informaatiojoukko määrittää mittaussuureen ilmoitettuun arvoon liittyvän epävarmuuden. Jonkin arvon muuttaminen johtaa informaatiojoukkoon liittyvän epävarmuuden muuttumiseen. [14, s. 35]

Jokaiseen mittausprosessiin liittyy epävarmuutta, minkä takia jokainen mittaustulos on likiarvo todellisesta mitasta. Mittaustulos onkin täydellinen vasta, kun mittaustuloksen yhteydessä esitetään mittausprosessin epävarmuus [11, s. 147]. Mittaamalla havaittu prosessin vaihtelu sisältää myös mittausprosessin vaihtelua. Kehittämällä mittausjärjestelmän suorituskyyä saadaan myös tarkempi kuva mitattavan prosessin suorituskyvystä [15, s. 133]. Mittausepävarmuudesta johtuva mittaustuloksen vaihtelu lisää mitattavan prosessin vaihtelua ja siten heikentää prosessin laaduntuottokkyä. Mittausepävarmuuden aiheuttamat toimet taas voivat tuoda merkittäviä lisäkustannuksia, jos mittausepävarmuuden vuoksi prosessin tuottamia virheellisiä tuotteita hyväksytään tai hyväksyttävissä olevia tuotteita romutetaan [15, s. 133]. Mittausepävarmuuteen vaikuttavia tekijöitä voidaan tunnistaa hyvinkin tarkasti ja mittausprosessikohtaisesti. Inhimillisinä tekijöinä saat-
taa olla, että mitattava kohde on määritelty epätarkasti tai ympäristötekijöitä ei ole huomioitu riittävästi. Mittaustulokseen saattavat vaikuttaa esimerkiksi mittauksen aikana sa-
tunnaisesti vaihtelevat ympäristöolosuhteet. Mittalaitteita myös tulkitaan mittaajakohtai-
sesti eri lailla, ja mittausmenetelmät ja mittalaitteet vaihtelevat. Lisäksi mittaustuloksia
voidaan laskea vaihtelevilla lukuarvoilla. [11, s. 147]

Myös mittausjärjestelmän suorituskyyyn vaikuttaa runsas joukko tekijöitä, joilla jokai-
sella on tapauskohtainen vaikutus. Tärkeimmät suorituskyyyn vaikuttavat tekijät ovat
kohdistus, toistettavuus, uusittavuus, pysyvyys, lineaarisuus ja epälineaarisuus, näytteen
vaihtelu, hystereesi, edustavuus, valideiteetti, herkkyys ja erottelukky. [15, s. 139–140]

Kohdistus on mittausjärjestelmän poikkeama tosimitasta eli tunnetusta mittanormaalista. Mikäli poikkeama on pieni ja toistuu samalla lailla, on kohdistus hyvä. Kohdistus on sys-
temaattinen virhe, jota voidaan pienentää laitteiston kalibroinnilla. Toistettavuus on ha-
jonta, joka syntyy saman mittaajan mitatessa samaa kappaletta samalla mittalaitteella sa-
moissa olosuhteissa useita kertoja. Toistettavuus on hyvä, jos mittaajan tulokset toistuvat
hyvin samanlaisina mittauskerrasta toiseen. Toistettavuutta voidaan parantaa mittauspro-
sessia harjoittelemalla. Uusittavuus on hajonta, joka muodostuu eri mittaajan mitatessa
saman kappaleen samalla mittalaitteella. Uusittavuus on hyvä, jos eri mittaajat saavat lä-
hes samat mittaustulokset samasta mittakappaleesta. Uusittavuuden virheet muodostuvat
tyypillisesti erilaisista mittaustekniikoista. Pysyvyys tarkoittaa mittaustulosten hajontaa,
jossa samalla mittalaitteella toistetaan sama mittaus pitkän ajan kuluessa. Pysyvyyttä var-
ten tarvitaan määrävälein tapahtuvia toistuvia mittauksia, joilla mittausten keskiarvoa ja
vaihteluväliä seurataan. Pysyvyyteen vaikuttavat muun muassa mittalaitteen kuluminen
ja kitka. Pysyvyys voidaan säilyttää mittalaittehuollolla, käyttökoulutuksella ja harjoitte-
lulla. Lineaarisuus on mittalaitteen kohdistuksen muutosta mittaosalueella. Jos kohdistus

on hyvä koko mittalaitteen alueella, on myös lineaarisuus hyvä. Mikäli kohdistus muuttuu mitta-alueella, on kyseessä epälineaarinen mittalaite, joka vaatii korjauskäyrän. Epälineaarisuutta voidaan kompensoida kalibroimalla mittalaite mahdollisimman laajasti koko mitta-alueella. Näytteen vaihtelulla tarkoitetaan yhden näytteen sisäistä vaihtelua, joka vaikuttaa mittausepävarmuuden määrittämiseen. Itse mittausprosessi voi myös vaikuttaa joissain tapauksissa mitattavaan kappaleeseen, jolloin mitattavan kappaleen ominaisuudet muuttuvat ja mittaustulokset eivät toistu samanlaisina. Hystereesi tarkoittaa mittalaitteen näyttämien eroa lähestyttäessä mitta-arvoa joko pienenevään tai suurenevaan suuntaan. Hystereesiin vaikuttaa esimerkiksi mittalaitteen kitka ja näyttämän viive. Edustavuudella tarkoitetaan valitun mittakohteen kelvollisuutta edustaa koko tutkittavaa mitauskohdetta. Koska mittaus perustuu tyypillisesti näyte-eriin, jotka muodostuvat yksittäisistä näytteistä, on kaikilla kappaleilla yhtä suuri mahdollisuus tulla valituksi mittauksen kohteeksi. Yleensä on syytä välttää ainakin erän ensimmäisten kappaleiden mittamista, koska prosessia tyypillisesti vasta säädetään haluttuihin arvoihin. Validiteetilla tarkoitetaan mittausmenetelmän kykyä antaa olennaista tietoa mitattavasta asiasta. Ulkoinen validiteetti on mittausjärjestelmän kyky mitata tarkoitettua suuretta, sisältövaliditeetti tarkoittaa taas menetelmän kykyä kattaa koko mitattava ilmiö. Rakennevaliditeetilla tarkoitetaan mitatun muuttujan yhdenmukaisuutta tutkittavan asian kanssa. Mittalaitteen herkkyydellä tarkoitetaan erikokoisten muutoksien vaikutusta mittalaitteen mittaustulokseen. Pieni herkkyys vaikuttaa mittalaitteen kykyyn huomioda muutos mitta-alueella. Erottelukyvyllä tarkoitetaan mittausjärjestelmän kykyä tuoda ilmi mitattavan suureen pienet muutokset. Suuri herkkyys parantaa mittalaitteen erottelukykyä. [15, s. 139–140]

Perussääntö luotettavalle mittausprosessille on, että mittausprosessin kokonaisvaihtelu saa olla korkeintaan 10 prosenttia käytössä olevasta toleranssialueesta. Kokonaisvaihtelu voidaan määritellä joko 95 prosentin eli 4σ ($\pm 2\sigma$) tai 99 prosentin eli $5,152\sigma$ ($\pm 2,58\sigma$) luottamusrajojen mukaan. [15, s. 134]

Standardin QS-9000 mukaan mittausta suorittavalla toimijalla on oltava dokumentoitu prosessi ja sen pohjalta kontrolloidaan, kalibroidaan ja ylläpidetään testi- ja mittauslaitteistoa, jolla todennetaan tuotannossa olevien tuotteiden vaatimustenmukaisuus. Mittauslaitteiston mittausepävarmuus tulee tuntea, ja sen on oltava riittävä tehtyihin mittauksiin nähden. Standardin QS-9000 mukaan mittausepävarmuuden määrittämiseen käytetyn menetelmän tulee perustua tietämykseen koko mittausjärjestelmästä, siihen liittyvistä ympäristötekijöistä ja hankitun tiedon soveltamiskohteista [16, s. 43]. Standardin SFS-EN ISO 10012 mukaan on mahdollista, että jotkin epävarmuuden komponentit ovat merkitykseltään vähäisempiä kuin toiset, minkä vuoksi niiden yksityiskohtainen määrittely teknisin tai taloudellisin perustein voi olla epäoikeutettua. Kaikissa tapauksissa epävarmuuksien määrittämiseen ja tallentamiseen kohdistetun panostuksen tulisi olla suhteessa siihen, miten tärkeä mittauksen tulos on organisaation lopputuotteen laadun kannalta. Mittaustuloksen epävarmuudessa tulisi ottaa huomioon muiden osatekijöiden ohella mitauslaitteiston kalibroinnin epävarmuus. Epävarmuuksien arvioinnissa voi olla avuksi, jos

tilastollisia menetelmiä käytetään tarkoituksenmukaisesti aikaisempien kalibrointien tulosten analysoinnissa ja usean samanlaisen mittauslaitteiston kalibroinnin tulosten vertailussa. [17, s. 28]

2.3.3 Mittausepävarmuuden laskeminen Gage R&R -menetelmällä

Gage R&R -menetelmä on amerikkalaisessa autoteollisuudessa kehitetty menetelmä mittausepävarmuuden määrittämiseen. Oikein käytettynä menetelmä antaa mittausepävarmuudelle luotettavan tuloksen. Mittausepävarmuus ilmoitetaan joko 95 prosentin ($\pm 2\sigma$) tai 99 prosentin ($\pm 2,58\sigma$) luottamustasolla. Gage R&R -testistä on käytössä kaksi vaihtoehtoista menetelmää, pitkä ja lyhyt menetelmä. Käyttämällä lyhyttä menetelmää saadaan selvitettyä menetelmän uusittavuuden ja toistettavuuden yhteinen prosenttiosuus toleranssialueesta tai mitatusta vaihtelusta. Pitkää menetelmää käyttämällä uusittavuuden ja toistettavuuden osuudet voidaan erotella toisistaan [15, s. 140]. Menetelmän tuloksia verrataan annettuun toleranssialueeseen, jolloin mittausepävarmuus voidaan jakaa kolmeen luokkaan:

Mittausepävarmuus $< 10 \%$, tulos on hyvä

$10 \% \leq$ mittausepävarmuus $\leq 30 \%$, tilanne täytyy arvioida

Mittausepävarmuus $> 30 \%$, mittausepävarmuus on liian suuri

Mittausepävarmuuden ollessa 10–30 prosentin luokassa, täytyy arvioinnissa huomioida erityisesti mittausprosessin suorituskyky, mittauskohteen kriittisyys ja menetelmän kehityksen kustannusvaikutus. Jos epävarmaan menetelmään päätetään tyytyä, se tarkoittaa, että mittausepävarmuus käyttää osan annetusta toleranssista ja toleranssialueen lähialueilla on vaara mittaustulosten väärin tulkintoihin ja täten prosessin suorituskyvystä saadaan todellisuudesta poikkeava kuva. Yli 30 prosentin mittausepävarmuudella saatuja tuloksia voidaan pitää enää suuntaa-antavina. [15, s. 141]

Gage R&R -testi aloitetaan kohteen määrittelyllä. Kohde on mittauslaite, jonka suorituskyky halutaan selvittää. Pöytäkirjaan kirjataan mittauksen kohde, käytetty mittausmenetelmä, käytetty mittalaite ja muut mittausjärjestelmän olennaiset seikat. Lisäksi arvioidaan olosuhteiden soveltuvuus mittauksen suorittamista varten. Mittaustulosten kirjaimista varten laaditaan mittauspöytäkirja. Mittauksen suorittajiksi valitaan henkilöt, joiden tehtävänkuvaan mittaaminen tavanomaisesti kuuluu [15, s. 142]. Mittaajia tulee olla vähintään kaksi henkilöä, joilla on riittävä koulutus mittaamiseen ja joiden tehtävänkuvaan mittaaminen muutenkin kuuluu [12, s. 217]. Mitattavia kappaleita tulee olla vähintään kymmenen kappaleen erä. Kappaleet merkitään siten, että mittaaja ei voi tunnistaa niitä mittauksen aikana [12, s. 217][15, s. 142]. Jos kymmentä näytettä ei ole saatavissa, täytyy mittaajien lukumäärää lisätä siten, että mittaajien (m) ja näytteiden (n) lukumäärä

on yli 15 ($m \times n > 15$) [15, s. 142]. Mikäli vaadittua tuloa ei saada muodostettua, täytyy käyttää korjauskertoimia, jotka on esitelty standardissa QS-9000 [15, s. 142].

Mittalaitteen tulee olla mitta-asteikoltaan sellainen, että tulokset voidaan jakaa vähintään kymmeneen osaan. Mikäli mitta-asteikko on tätä karkeampi, on mittalaite niin sanotusti tukossa, eli toistettavuus- ja uusittavuusvirhettä ei voida todentaa riittävällä tarkkuudella [15, s. 142]. Lisäksi tulee tarkastaa mittalaitteen fyysinen kunto ja kalibroinnin voimassaolo [12, s. 217]. Mitattavat kappaleet toimitetaan mittaajalle satunnaisessa järjestyksessä. Mittaajille ei anneta tietoa omista tai muun vertailuryhmän mittaustuloksista mittauksen aikana. Mittausjärjestelyn tulee olla kaikille mittaajille samanlainen. Mittaajia tulee olla vähintään kaksi tai useampia, jotta mittauksista saadaan luotettavampia tuloksia. Mikäli mittauksessa havaitaan selvästi virheellisiä tuloksia, ne hylätään pois mittausarjoista. Jos virheellisiä tuloksia on useita, täytyy mittausjärjestelyn soveltuvuus arvioida. Mikäli mittaustulokset taas ovat liian samankaltaisia, täytyy tutkia, peittääkö mitausjärjestelmän erottelukyky alleen mitattavien näytteiden välisen vaihtelun [15, s. 142].

Ensimmäiseksi selvitetään jokaisen mittaajan näytekohtainen vaihteluväli vähentämällä jokaisen näytteen suurimmasta mittaustuloksesta pienin mittaustulos. Mittaustulos voi olla nolla tai sitä suurempi lukema. Mikäli vaihteluvälistä yli 25 prosenttia on arvoltaan nolla, ei mittausmenetelmä pysty erottelemaan vaihtelua. Tällöin toistettavuuden arvoksi muodostuu liian pieni tulos, jolloin R&R ei ole luotettavalla tasolla [15, s. 144].

Lasketaan mittaajan A ensimmäisen näytteen vaihteluväli (R_{Ap1}) kaavalla, jossa x_{At1p1} on mittaajan A saama tulos ensimmäisessä mittaussarjassa ensimmäisestä näytteestä:

$$R_{Ap1} = \max(x_{At1p1}; x_{At2p1}; x_{At3p1}) - \min(x_{At1p1}; x_{At2p1}; x_{At3p1}) \quad (1)$$

Määritetään mittaajakohtaisesti laskettujen näytteiden vaihteluvälien keskiarvo (\bar{R}_A) kaavalla, jossa n on näytteiden lukumäärä:

$$\bar{R}_A = (R_{Ap1} + R_{Ap2} + \dots + R_{Apn})/n \quad (2)$$

Määritetään mittaajakohtaisesti laskettujen vaihteluvälien keskiarvojen keskiarvo ($\bar{\bar{R}}$) kaavalla, jossa m on mittaajien lukumäärä:

$$\bar{\bar{R}} = (\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C)/m \quad (3)$$

Lasketaan vaihteluvälien ylävalvontaraja (UCL_R) ja alavalvontaraja (LCL_R). Luvut D_3 ja D_4 saadaan liitteen B taulukosta. D_3 on määritetty vain jos mittaajakohtaisten mittaussarjojen (t) lukumäärä on suurempi kuin kuusi.

$$UCL_R = D_4 * \bar{\bar{R}} \quad (4)$$

$$LCL_R = D_3 * \bar{\bar{R}} \quad (5)$$

Jos vaihteluväleissä havaitaan valvontarajat ylittäviä tuloksia, mittaukset täytyy uusaa tai kyseiset tulokset poistetaan ja lasketaan uudelleen. Mikäli näytteitä poistetaan joltain mittaajalta, on vastaavat tulokset poistettava myös muilta mittaajilta.

Lasketaan mittaajien mittaussarjojen keskiarvot ($\bar{x}_{At1}, \bar{x}_{At2}, \bar{x}_{At3}, \bar{x}_{Bt1}, \dots, \bar{x}_{Ct3}$). Mittaajan A ensimmäisen mittaussarjan keskiarvo:

$$\bar{x}_{At1} = (\bar{x}_{At1p1} + \bar{x}_{At1p2} + \dots + \bar{x}_{At1pn})/n \quad (6)$$

Lasketaan mittaajien mittaussarjojen kokonaiskeskiarvot ($\bar{\bar{X}}_A, \bar{\bar{X}}_B, \bar{\bar{X}}_C$). Mittaajan A kokonaiskeskiarvo:

$$\bar{\bar{X}}_A = (\bar{\bar{X}}_{At1} + \bar{\bar{X}}_{At2} + \bar{\bar{X}}_{At3})/m \quad (7)$$

Lasketaan mittaajien keskiarvojen vaihteluväli (\bar{X}_{DIFF}) vähentämällä suurimmasta vaihteluvälistä pienin:

$$\bar{X}_{DIFF} = \max(\bar{\bar{X}}_A, \bar{\bar{X}}_B, \bar{\bar{X}}_C) - \min(\bar{\bar{X}}_A, \bar{\bar{X}}_B, \bar{\bar{X}}_C) \quad (8)$$

Lasketaan jokaisen näytteen kaikkien mittausten keskiarvo ($\bar{x}_{p1}, \bar{x}_{p2}, \bar{x}_{p3} \dots \bar{x}_{pn}$). Ensimmäisen näytteen mittausten keskiarvo:

$$\bar{x}_{p1} = (x_{At1p1} + x_{At2p1} + \dots + x_{Ct3p1})/(m * r) \quad (9)$$

Lasketaan näytteiden keskiarvojen vaihteluväli (R_p) vähentämällä suurimmasta arvosta pienin:

$$R_p = \max(\bar{x}_{p1}, \bar{x}_{p2} \dots \bar{x}_{pn}) - \min(\bar{x}_{p1}, \bar{x}_{p2} \dots \bar{x}_{pn}) \quad (10)$$

Lasketaan toistettavuus eli laitevaihtelu (EV). Kerroin K_1 määritetään liitteen B taulukosta. Jotta kerroin voidaan määrittää, täytyy näytteiden (n) ja mittaajien lukumäärän (m) tulon (g) olla suurempi kuin 15.

$$g = n * m \quad (11)$$

$$EV = \bar{\bar{R}} * K_1 \quad (12)$$

Lasketaan uusittavuus (AV) eli mittaajasta johtuva vaihtelu. Kerroin K_2 määritetään mittaajien lukumäärän (m) ja luottamustason mukaan liitteen B taulukosta.

$$AV = \sqrt{(\bar{x}_{DIFF} * K_2)^2 - (EV^2/nr)} \quad (13)$$

Lasketaan uusittavuuden ja toistettavuuden yhteisvaikutus eli mittausepävarmuus ($\&R$):

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (14)$$

Lasketaan kerroin K_3 luottamustason ja näytteiden lukumäärän mukaan. Arvo d_2^* saadaan liitteestä B.

$$K_3 = 5,15/d_2^* \quad (15)$$

Näytevaihtelu (PV) saadaan näytteiden vaihteluvälin (R_p) ja kertoimen K_3 tulosta:

$$PV = R_p * K_3 \quad (16)$$

Lasketaan kokonaisvaihtelu (TV), joka on osavaihtelun ja mittausepävarmuuden yhteisvaikutus:

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2} \quad (17)$$

Lasketaan toistettavuuden ($\%EV$), uusittavuuden ($\%AV$), mittausepävarmuuden ($\%R\&R$) ja näytevaihtelun ($\%PV$) osuus kokonaisvaihtelusta (TV):

$$\%EV = EV * \frac{100}{TV} \% \quad (18)$$

$$\%AV = AV * \frac{100}{TV} \% \quad (19)$$

$$\%R\&R = R\&R * \frac{100}{TV} \% \quad (20)$$

$$\%PV = PV * \frac{100}{TV} \% \quad (21)$$

Lasketaan toistettavuuden ($\%EV$), uusittavuuden ($\%AV$), mittausepävarmuuden ($\%R\&R$), näytevaihtelun ($\%PV$) ja kokonaisvaihtelun ($\%TV$) osuus toleranssista (T):

$$\%EV = EV * \frac{100}{T} \% \quad (22)$$

$$\%R\&R = R\&R * \frac{100}{T} \% \quad (23)$$

$$\%PV = PV * \frac{100}{T} \% \quad (24)$$

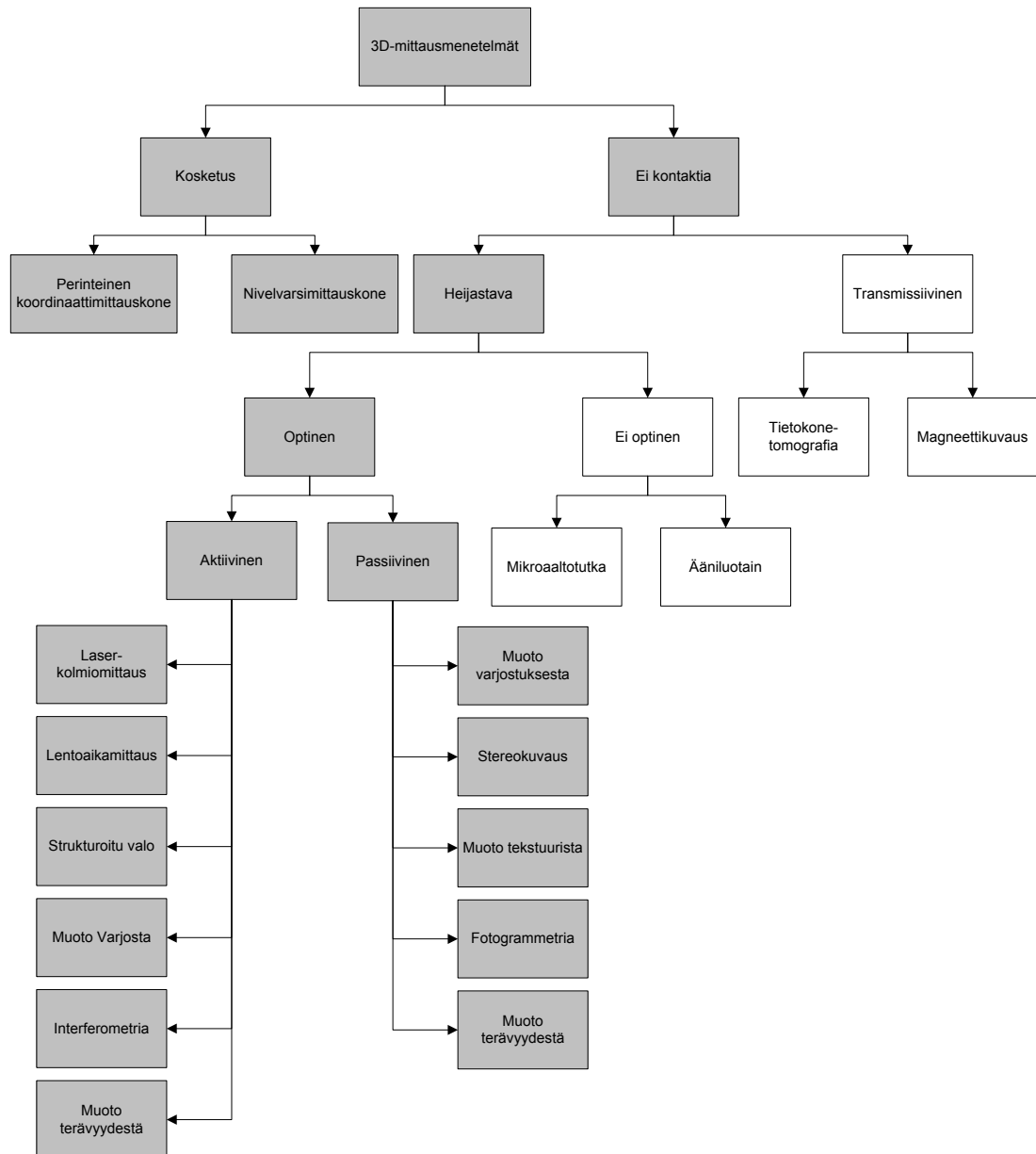
$$\%TV = TV * \frac{100}{T} \% \quad (25)$$

[15, s. 144 - 148].

2.4 Koordinaattimittaus

Standardin SFS-EN ISO 10360-1 + AC mukaan koordinaattimittaus on koordinaattipisteiden määrittämistä koordinaattimittauskoneella. Standardin mukaan koordinaattimittauskone on siirrettävä mittausjärjestelmä, jonka avulla voidaan määrittää koordinaattipisteet mitattavan kappaleen pinnalta [18, s. 13]. Koordinaattimittaus voidaan jakaa eri kategorioihin sen mukaan, kuinka kappaleen mittaus suoritetaan. Perinteiset koskettavat koordinaattimittauskoneet ovat paikoillaan sijaitsevia mittausjärjestelmiä, joita voidaan hyödyntää kappaleiden laaduntarkastuksessa. Perinteisten koskettavien koordinaattimittauskoneiden rinnalle ovat markkinoille tulleet koskettavat, käsivarsityyppiset mittakoneet eli nivelfarsikoordinaattimittauskoneet. Nivelfarsimittakoneet ovat huomattavasti joustavampia käyttää kuin perinteiset koordinaattimittauskoneet, etenkin suurissa mitauksissa. [2, s. 285–286]

Perinteisen koskettavan mittausmenetelmän rinnalle ovat viime vuosina nousseet myös optiseen menetelmään perustuvat koordinaattimittalaitteet, joissa mittauksen aikana ei kosketa kappaleeseen. Optisiin mittalaitteisiin on sovellettu useita eri optisen mittaamisen periaatteita, ja käytettyjä menetelmiä on useita. Optiset mittalaitteet soveltuvat laaja-alaisesti eri mittaustehtäviin menetelmästä riippuen. [2, s. 285–286] 3D- (engl. three-dimensional, kolmiulotteinen) mittaus voidaan jakaa useisiin alakategorioihin menetelmän ja sovellusten mukaisesti. Kuvassa 2.5 on esitetty 3D-koordinaattimittauksen yksi jaottelumalli. Optinen mittaus voidaan jakaa myös sekä aktiivisiin että passiivisiin menetelmiin. Aktiivinen järjestelmä tuottaa aktiivisesti valosäteilyä säteilylähteellä, jonka heijastumaa tai suodattumista mitataan mitta-anturilla. Passiiviset järjestelmät eivät tuota itse säteilyä vaan hyödyntävät sen sijaan olemassa olevan ympäristön säteilyn. [19, s. 331]



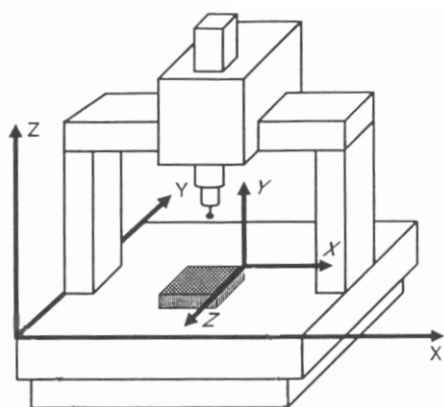
Kuva 2.5 3D-koordinaattimittausmenetelmien jaottelu, perustuu lähteeseen [19]

Tyypillisesti 3D-mittausmentelmillä pyritään tuottamaan mitatusta kohteesta pistepilvi. Pistepilvi koostuu yksittäisistä koordinaattipisteistä, joiden sijainti tiedetään. Pistepilvet mitataan yleensä jatkokäsittelyä varten, eli pistepilviä käytetään mitatun kohteen mallintamisessa. Kohteen mallintamisen laatuun vaikuttaa suoraan mallintamisessa käytettävän pistepilven pisteiden keskinäinen välimatka. Nyrkkisääntönä on, että mitä tiheämpi on mitattu pistepilvi, sitä tarkemmin pystytään mallintamaan yksityiskohtia. Tiheästäkin pistepilvestä ei ole kuitenkaan hyötyä, jos mitatun pistepilven pisteiden tarkkuus on huono. Pistepilven laatuun vaikuttavat muun muassa yksittäisen pisteen laatu, pistepilven tiheys ja erikseen mitattujen pistepilvien yhdistämisen laatu. Eräs tärkeä tekijä on myös mitattujen pisteiden hajonta, johon vaikuttaa suuresti mittaussäteen osumiskulma kohteeseen. Kohteiden mallintamisessa on siksi tärkeää huomioida jäännösvirheiden seuranta. [20, s. 3–4]

2.4.1 Koordinaattimittauskone

Koordinaattimittauskone (KMK) on kehitetty 1960-luvulla, ja se perustuu rakenteeltaan työstökoneeseen. Koneet kehitettiin mittamaan geometrisia muotoja ja lineaarisia mittoja pienellä mittausepävarmuudella. Koordinaattimittalaitteita on kehitetty eri käyttötarkoituksiin, ja ne eroavat rakenteeltaan toisistaan. Perinteisesti koneet jaotellaan puomi-, silta-, portaali- ja pylvästyyppeihin koneisiin [2, s. 285–286]. Nykyisin koordinaattimittauskone on laaja-alaisesti käytetty työkalu laadunvarmistuksessa useilla teollisuuden ja tutkimuksen osa-alueilla. Koordinaattimittauskoneen toiminta perustuu perinteisesti kuu-teen vapausakseliin, jotka voivat olla joko operaattorin manuaalisesti käyttämiä tai automatisoituja ohjelmallisesti ohjattavia. Koordinaattimittauskone voi olla varustettu useilla erilaisilla mittauskärjillä, kuten esimerkiksi mekaaninen kytkentäanturi, mittaava anturi, laser tai optinen anturi [21, s. 138]. Koordinaattimittakoneen liikkeet tapahtuvat johteiden avulla, jotka ovat kitkan minimoimiseksi tavallisesti paineilmapöydeltä. Tyypillisesti johteiden paikkatiedot kerätään lasisien mittasauvojen avulla suoraan johteen luistista. Kerätty paikkatieto muutetaan mittausgeometriaksi KMK:n mittausohjelmiston avulla. KMK:n runko on tyypillisesti kivi-, keraami-, alumiini- tai komposiittimateriaalia, ja taso on tehty hiotusta diabaasikivestä [22, s. 44–48].

Koordinaattimittauskone mittaa työkappaleesta pisteitä avaruudessa, johon on asetoitu esimerkiksi laitteen oma tai työkappaleen koordinaatisto. Koordinaatiston valitseminen ja luominen on ensiarvoisen tärkeää mittaustulosten oikeellisuuden kannalta: yleensä koordinaatisto luodaan kulkemaan työkappaleen peruselementtien, kuten tason, lieriön, suoran, ympyrän tai pisteen kautta [23, s. 3]. Kuvassa 2.6 on esimerkinomaisesti esitetty kappalekoordinaatiston sijoittuminen kappaleeseen nähden. Matemaattisia algoritmeja ja suodatustapoja käyttäen pisteistä voidaan muodostaa perusmuotoja, kuten suoria, tasoja, kartioita ja ympyröitä. Näistä perusmuodoista voidaan rakentaa digitaalinen malli mitatusta kappaleesta ja verrata sitä esimerkiksi tekniseen piirustukseen tai CAD- (engl. computer aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu) tiedostoon [23, s. 3].



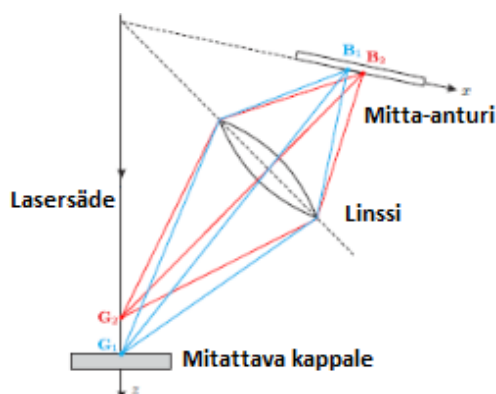
Kuva 2.6 Koordinaattimittauskoneen liikeradat ja kappalekoordinaatisto [22]

2.4.2 Nivelvarsikoordinaattimittauskone

Nivelvarsikoordinaattimittauskone muistuttaa etäisesti robottia. Nivelvarsityyppisessä koneessa on tyypillisesti kuusi tai seitsemän vapausastetta, jotka on toteutettu kiertyvillä nivelillä. Niveliä liikutellaan käsin, ja jokainen nivel välittää kulmatiedon mittausohjelmistolle, joka laskee automaattisesti mittakärjen asentoa X,Y,Z-koordinaatistossa. Mittalaitteen koko eli ulottuvuus määräytyy nivelvarsien pituuksista. Nivelvarsikoordinaattimittauskoneen mittausalue on pallokalotin muotoinen alue. Koneen käsivarsi pyritään rakentamaan mahdollisimman kevyeksi, jotta konetta on kevyt käsitellä. Lisäksi materiaalin tulee olla lämpölaajenemisen kannalta mahdollisimman neutraali. Suosittu käsivarren materiaali uusissa koneissa onkin hiilikuitu. Koneen tarkkuus määräytyy nivelvarsien pulssiantureiden resoluutiosta ja käsivarren elementtien pituudesta. Kulma-anturin resoluutio ja sisäiset virheet kerrottuna käsivarren pituudella vaikuttavat mittauskärjen paikan tarkkuuteen. Nivelvarsikoordinaattimittauskoneet on tehty siirreltäviksi, ja niitä siirrellään perinteisesti varta vasten suunnitelluissa kuljetuslaatikoissa. Mittakoneet ovat varustettavissa kaikilla samoilla mittauskärjillä kuin perinteiset käsikäyttöiset koordinaattimittauskoneet [22, s. 59–61]. Koordinaattimittauskoneiden rakenne ei ole koskaan stabiili, vaan se muuttaa aina muotoa elinkaarensa aikana. Pyöriviin aksiaali- ja radiaaliviveliin sekä varsiin perustuvien koneiden virheiden korjaus on hankalaa ohjelmallisesti, ja koneet vaativatkin laajan huollon ja kalibroinnin vähintään kerran vuodessa. Kun kone on uusi, muutokset ovat vielä suurempia kuin vanhoissa koneissa. [22, s. 71–72]

2.4.3 Laserkolmiomittaus

Laserkolmiomittausmenetelmää hyödynnetään useissa optisen mittaamisen sovelluksissa etäisyyksien määrittämiseen. Kolmiomittausmenetelmä perustuu tasossa olevien kolmioiden sivujen ja kulmien määrittämiseen, kun osa lähtötiedoista on jo tiedossa. Kolmiomittauksessa kappale valaistetaan lasersäteellä, joka heijastuessaan takaisin kappaleen pinnalta mitataan mitta-anturilla. Laser (engl. light amplification by stimulated emission of radiation) on erittäin hyvin soveltuva valonlähde kappaleiden 3D-kuvantamiseen. Laser on kirkas, yksivärinen ja hyvin suunnattavissa oleva valon lähde. Parhaiten menetelmään soveltuvat mitattavat pinnat, jotka eivät ole täysin valoa heijastavia tai heijastamattomia. Mattamateriaalit soveltuvat menetelmään parhaiten. [24, s. 3]



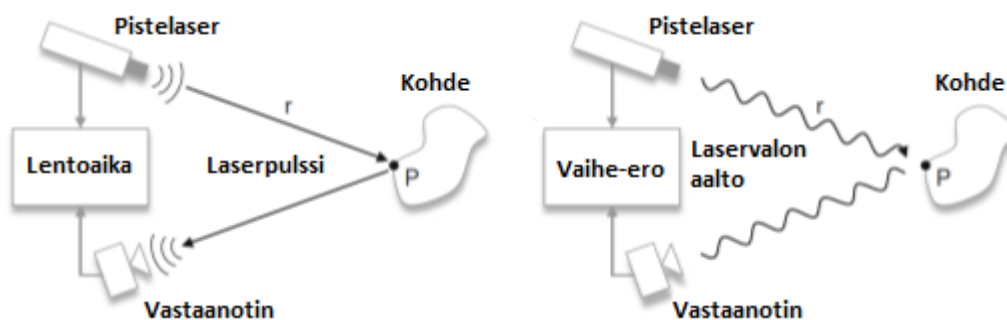
Kuva 2.7 Pisteperusteinen laserkolmiomittaus, perustuu lähteeseen [25]

Kuvan 2.7 menetelmässä mitattavasta kappaleesta heijastuva piste ohjautuu mitta-anturille mitattavan kappaleen etäisyydestä huolimatta, koska laserlähteen, linssin ja anturin sijainti on tiedossa. Mitta-anturina voidaan käyttää liikeherkkää tunnistinta tai kameraa. Kolmiomittausmenetelmällä voidaan saavuttaa suuruusluokaltaan $1\ \mu\text{m}$:n mittausepävarmuus. [25, s. 255–259]

2.4.4 Lentoaika- ja vaihe-eromenetelmä

Kappaleiden laserskannauksessa käytetään käyttötarkoituksesta riippuen joko vaihe-ero- tai lentoaikamenetelmää, joiden toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.8. Lentoaikamenetelmä hyödyntää lasersäteen lentoajan mittaustietoa mittaushetken etäisyyden määrittämiseen. Menetelmää käytetään perinteisesti pitkien etäisyyksien skannauksessa laserkeilaimissa ja seuraimissa. Kappaleeseen kiinnitetään tarvittaessa heijastavia tarroja mitattaviin kohtiin, minkä jälkeen järjestelmän lähettimellä muodostetaan laserpulssi kappaleen pinnalle joko tasisella tai vaihtelevalla aallon muodolla. Järjestelmän vastaanotin ottaa vastaan kappaleen pinnalta heijastuvan pulssin, ja järjestelmä mittaa käytetyn lentoajan sekä signaalin intensiteetin. Lähetin täytyy olla synkronoitu ajanottojärjestelmän kanssa, jotta aikaero voidaan mitata. Menetelmän tarkkuus vaihtelee mittausetäisyyden ja kohteen mukaan. Menetelmä soveltuu erinomaisesti 15–100 metrin mittausetäisyyksille. Alle yhden metrin kokoluokkaa olevat kohteet eivät sovellu menetelmälle ilman muutoksia mittaussysteemiin. [13, s. 169][19, s. 332][25, s. 308–309]

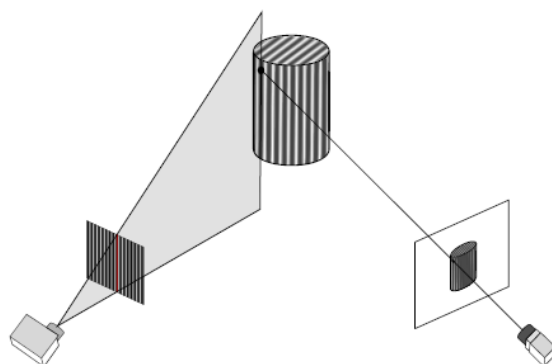
Vaihemenetelmän toimintaperiaate on hyvin samankaltainen, mutta menetelmä laskee lähetetyn ja palavaan pulssin vaihemuutoksen lentoajan sijasta. Vaihe-erolaserin toiminta perustuu lasersäteiden heijastamiseen mitattavan kappaleen pinnalle, josta se heijastuu takaisin osittain läpäisevän peilin kautta mitta-antureille. Lähetetyn ja heijastuneen säteen vaihe-erosta voidaan laskea etäisyys pisteeseen. Menetelmällä saadaan lyhyellä toimintamatkalla nopeasti etäisyysmittoja mitattavaan kappaleeseen, ja se soveltuu hyvin monimutkaisten kappaleiden skannaamiseen. Menetelmää voidaan tarkentaa käyttämällä samanaikaisesti useita eri aallonpituuksia sisältävää sädettä, mutta samalla säteen vastaanottaminen ja käsittely hankaloituu huomattavasti. [13, s. 169][19, s. 332][25, s. 308–309]



Kuva 2.8 Lentoaika- ja vaihe-eromenetelmän periaatekuva, perustuu lähteeseen [19]

2.4.5 Strukturoitu valo

Strukturoidun valon menetelmässä kappaleen pinnalle heijastetaan ennalta määrätty valokuvio halutussa kulmassa. Kappaleen pinnalta heijastuva valo muodostaa kappaleen kuvion koordinaatit, jotka luetaan erillisellä kameralla ja lasketaan kolmiomittausmenetelmällä kuvan 2.9 periaatteen mukaisesti. Heijastettu kuvio voi olla esimerkiksi piste, viiva tai verkko, mutta verkon käyttö helpottaa kappaleen tunnistamista etenkin reuna-alueilla. Menetelmän tarkkuus riippuu pääasiassa kuvaavan kameran resoluutiosta. Kohteen geometria ja valaistus eivät ole kriittisiä osa-alueita, mutta kappaleen pinta ei kuitenkaan saa olla täysin heijastava tai heijastamaton, jotta mittaus onnistuu. Yleisesti järjestelmissä käytetään viivamaista valoa, ja valoja voi olla myös useita prosessin tehostamiseksi. Olennaista on kuitenkin se, että valo ei saa olla epätarkka. Valokuviot voidaan tuottaa laserin ja optiikan avulla tai soveltuvalla projektorin ja tietokoneen yhdistelmällä. Menetelmän etu on sen nopeus – jopa miljoonia pisteitä sekunnissa. Myös kappaleen väriskaala on mahdollista taltioida. [19, s. 332][25, s. 263]



Kuva 2.9 Strukturoidun valon menetelmän toimintaperiaate [26]

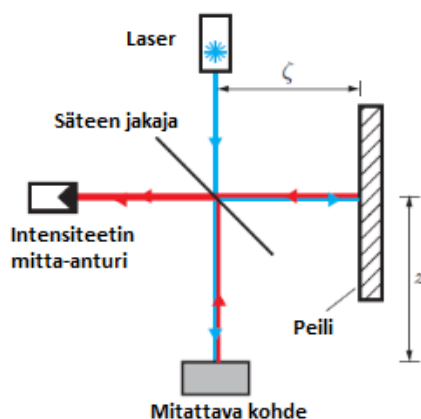
2.4.6 Muoto varjosta

Muoto varjosta -menetelmässä kappaleen 3D-muoto päätellään kappaleesta muodostuneen varjon perusteella. Menetelmää käytetään sovelluksissa, joissa halutaan muodostaa kolmiulotteinen malli visuaalisen näkymän perusteella. Menetelmän etuna on se, että kaikki tieto on yhdessä kuvassa ja kappaleesta muodostuvan varjon sisältö on aina vakio. Käytännön ongelmaksi muodostuu kuitenkin usein valolähteen ja varjostuvan pinnan parametrien tarkka

määrittely. Ongelmaksi voivat myös muodostua kappaleen pinnalla tapahtuvat materiaali-, tekstuuri- ja värisävyvaihtelut, jotka vaikuttavat esimerkiksi varjon rajauksen laatuun. Varjojen käyttäminen kappaleiden 3D-mallintamiseen onkin edelleen vahvasti tutkimuksen alla oleva aihealue. Ei-tasomaisten kappaleiden mallin muodostaminen on käytössä olevalla teknologialle yhä haastavaa. [27, s. 724–725]

2.4.7 Interferometria

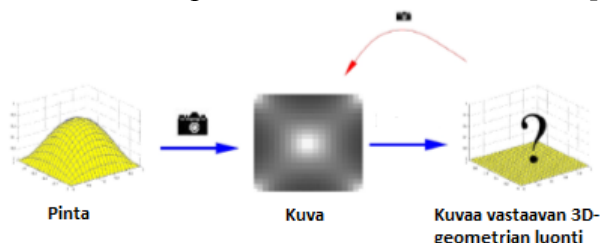
Interferometri on 1800-luvun loppupuolella kehitetty optinen mittalaite, jota käytetään esimerkiksi etäisyyksien määrittämiseen. Menetelmä perustuu valon interferenssi-ilmiöön, joka syntyy kahden tai useamman valoallon esiintyessä samanaikaisesti samassa tilassa. Menetelmällä päästään soveltuvissa olosuhteissa alle mikrometrin mittaustarkkuuteen [25, s. 309]. Interferometreissä käytetään tyypillisesti monokromaattista valoa. Menetelmän edellytyksenä on, että kohtaavien aaltojen vaihe-ero säilyy vakiona eli ne ovat koherentteja. Interferometreissä koherentit aallot muodostetaan jakamalla valolähteen monokromaattinen valo kahdeksi aalloksi puoliläpäisevän peilin avulla. Jaettuja aaltoja kutsutaan referenssi- ja mittausaalloksi. Referenssiaalto kulkee tietyn reitin ja matkan, kun taas mittausaalto kulkee matkan, johon kuuluu myös mitattava kappale. Samasta valolähteestä peräisin olevien aaltojen vaihe-ero on vakio, ja kun eriytyneet aallot saatetaan jälleen yhteen, syntyy interferenssikuvio. Kuvion ulkonäkö riippuu siitä, millainen vaihe-ero kahden interferoivan aallon välillä on. Mikäli aallot ovat samassa vaiheessa, aallot vahvistavat toisiaan. Mikäli kohtaavat aallot ovat vastakkaisessa vaiheessa, aallot heikentävät toisiaan [25, s. 309–311]. Menetelmän toimintaperiaatekaavio on esitetty kuvassa 2.10. Etäisyyden mittaamisen perustana on, että säteiden matkaeroa muutetaan hitaasti interferometrin peilin avulla, jolloin interferenssikuvioista voidaan laskea sekä syntyvien että sammuvien renkaiden lukumääriä. Matkaeron muutos on verrannollinen laskettuun rengasmäärään ja säteilylähteen lähettämän valon aallonpituuteen. [25, s. 309–311]



Kuva 2.10 Interferometrin toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [25]

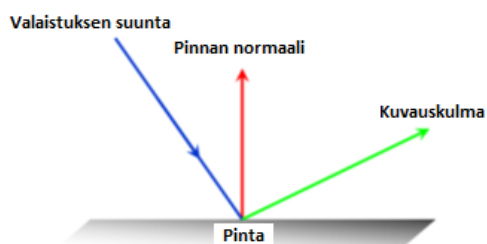
2.4.8 Muoto varjostuksesta

Varjostamista on perinteisesti käytetty kuvataiteessa tuomaan perspektiiviä kaksiulotteisiin kuviin. Tuomalla kappaleisiin syvyysvaikutelma saadaan visuaalinen efekti kolmiulotteisen muodon syvyydestä [28, s. 1]. Teollisesti muoto varjostuksesta -menetelmää käytetään muun muassa kaksiulotteisen geometrian siirtämiseksi takaisin kolmiulotteiseen muotoon periaatekuvan 2.11 mukaisesti [29, s. 1].



Kuva 2.11 Muoto varjostuksesta -prosessi, perustuu lähteeseen [30]

Kohteesta otetun kuvan intensiteetti vaihtelee yleensä kuvakohtaisesti, ja siihen vaikuttavat olennaisesti valaistus, kappaleen pinnan heijastavuus ja muoto sekä kuvan ottamiseen käytetty kuvausväline [30, s. 2]. Valaistuksen tärkeimmät seikat ovat valon suunta, intensiteetti ja spektrin valon jakauma. Kappaleen pinnan heijastavuuteen vaikuttaa kappaleen pinnan materiaali, joka voi olla hyvinkin heijastava tai täysin matta. Valon heijastavuus pinnasta vaikuttaakin olennaisesti siihen, millainen kuva kappaleesta muodostuu vallitsevissa valaistusolosuhteissa. Kuvattavan kappaleen geometria vaikuttaa myös olennaisesti 2D- (engl. two-dimensional, kaksiulotteinen) kuvan muodostumiseen ja sitä kautta 3D-geometrian uudelleenluontiin. Koska kaikkia muuttujia ei prosessi aina pysty hallitsemaan, täytyy prosessin aikana tehdä myös olettamuksia, jotka luonnollisesti vaikuttavat myös lopputulokseen. [30, s. 2]

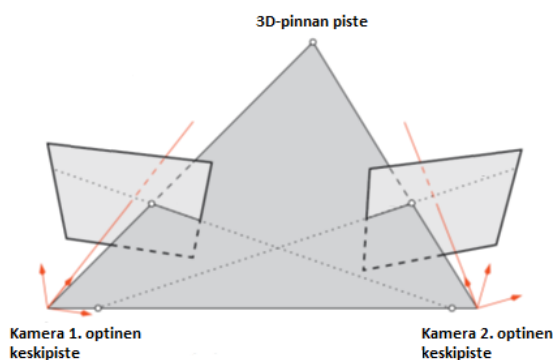


Kuva 2.12 Valaistuksen ja kuvauskulman välinen suhde pinnan normaalin nähden, perustuu lähteeseen [30]

Mikäli kuvauksen kohteena olevan kappaleen pinnan normaali tunnetaan kaikissa pinnan pisteessä, voidaan kuvan pohjalta mallinnettavan 3D-kappaleen pinta mitoittaa tarkasti oikeaan mittasuhteeseen. 3D-pinnan luomiseksi pyritäänkin laskemaan normaali kaikille kappaleen pinnan pisteille tunnetuilla valaistusrvoilla, kuvan 2.12 mukaisesti [30, s. 3]. Menetelmän ongelmana on tyypillisesti järjestelmän kyky erottaa kuperat ja koverat pinnat toisistaan, jolloin suuntavektoreita joudutaan korjaamaan manuaalisesti [29, s. 1]. Kappale voidaan valaista myös spektrin eri valonpituuksilla ja valaistuskulmilla samanaikaisesti, jolloin kappaleen 3D-muodon muodostaminen nopeutuu [25, s. 302–303].

2.4.9 Stereokuvaus

Stereokuvaus on menetelmä, jossa kahta tai useampaa kameraa hyödyntämällä voidaan luoda kolmiulotteinen malli kohteena olevasta kappaleesta. Menetelmä perustuu kahden kameran järjestelmään, jossa kameroiden sijainnit tunnetaan toisiinsa nähden ja saatujen tulosten avulla voidaan laskea kohteena olevan kappaleen mittauspisteet kolmiomittauksen avulla. Järjestelmä vaatii huolellisen kalibroinnin, jotta kameroiden ottamien kuvien pisteet vastaavat toisiaan ja saatu data on luotettavaa. Kameroiden yhteisten pisteiden löytämistä kutsutaan stereovastaavuudeksi. Koska kameroiden mekaaninen säätäminen ei tuo riittävää tarkkuutta menetelmään, tehdään järjestelmän lopulliset säädöt digitaalisesti kalibroinnin yhteydessä. Kalibrointi tehdään perinteisesti erityisen kalibroitukuvion avulla, jolloin kameroiden ottamien kuvien yhtenevät pikselit kalibroidaan vastaamaan kuviossa esitettäviä kalibroitimerkkejä [31, s. 283–284]. 3D-kappaleen muoto saadaan ottamalla lukuisia stereokuvia kohteesta ja yhdistämällä mitattu data pistepilveksi, jonka avulla kappaleen geometria voidaan luoda [31, s. 285]. Menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.13.



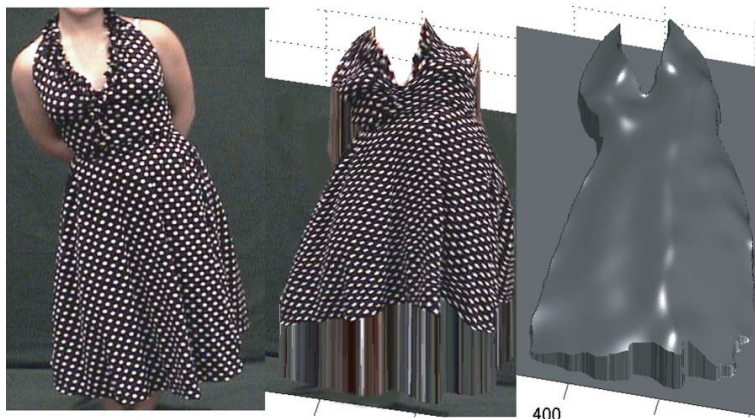
Kuva 2.13 Stereokuvausjärjestelmän toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [31]

Stereokamerajärjestelmän tarkkuus riippuu useasta eri tekijästä. Kameroiden resoluutio, mitattavan kappaleen etäisyys ja kameroiden keskinäinen asemointi, stereonäköanturin suorituskyky ja etsittävien piirteiden tunnistettavuus ovat seikkoja, jotka vaikuttavat järjestelmän tarkkuuteen. [31, s. 286]

2.4.10 Muoto tekstuurista

Tekstuuri soveltuu hyvin ihmissilmälle syvyysinformaation välittämiseen. Jopa hyvin yksinkertaiset tekstuuriset elementit sisältävät syvyystietoa, ja muodot voivat olla myös hyvin monimutkaisia. Luonnolliset tekstuurit tarjoavat runsaasti tietoa, jonka mukaan pystyy päättämään kolmiulotteisen muodon [32, s. 1]. Menetelmä keksittiin vuonna 1950, kun havaittiin etäisyyden ja orientaation vaikutus samanlaisten pintakuvioiden havainnointiin [33]. Myös tekstuurin pinnan kuvioilla on merkitystä: esimerkiksi pyöreät muodot tasopinnalla vaikuttavat ensin elliptisiltä ja sitten taas tasoittuivat välimatkan kasvaessa [34, s. 407].

Geometrian esiintymisen muutokseen kappaleen pinnan tekstuurissa vaikuttaa pääasiassa kolme muuttujaa: tekstuurin rakenne-elementtien pituuden muutos, skaalaus tai tiheyden muutos [32, s. 1]. Jotta pintakuvioalkioiden paikka voidaan kappaleen pinnalla määrittää, täytyy tietää kuvion kaltevuus ja kallistuskulma. Kaltevuus kertoo alkion kallistuksen määrän ja kallistuskulma rotaation määrän kappaleen pinnalla [33]. Kuvassa 2.14 on esitetty esimerkinomaisesti muoto tekstuurista -menetelmän käsittelyvaiheita.



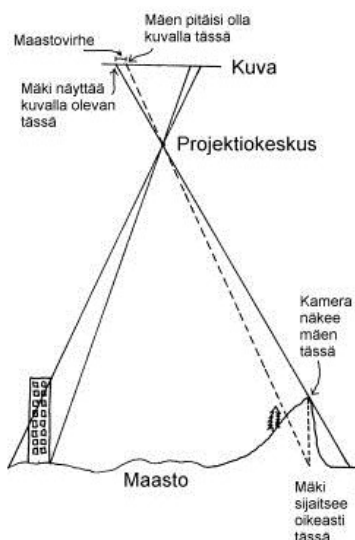
Kuva 2.14 Muoto tekstuurista – vaiheet 2D-kuvasta 3D-geometriaksi [32]

Menetelmä vaatii paljon laskentatehoa tietokoneilta, ja toistaiseksi menetelmää ei ole sovellettu kovin laajalti konenäköjärjestelmissä [34, s. 408].

2.4.11 Fotogrammetria

Fotogrammetria eli kuvanmittaus on menetelmä, jossa tutkitaan kohteen geometriaa välillisesti kohteesta otetun kuvan kautta. Menetelmässä määritellään kuvan ja geometrian välinen suhde kuvanottohetkellä, minkä jälkeen otettua kuvaa voidaan hyödyntää kohteen tutkimiseen. Fotogrammetriassa käytetään tyypillisesti erikoiskameroita, jotka ovat kyseiseen menetelmään rakennettuja, mutta myös perinteisillä kameroilla otettuja kuvia voidaan analysoida. Fotogrammetriaa eivät rajoita ulkoiset olosuhteet, vaan kohdetta voidaan kuvata hyvinkin monenlaisissa olosuhteissa. Menetelmässä voidaan hyödyntää myös röntgenaaltojen, ääniaaltojen tai elektronimikroskoopin tuottamia kuvia, jolloin voidaan tutkia kohteen sisäosia rakennetta rikkomatta [35].

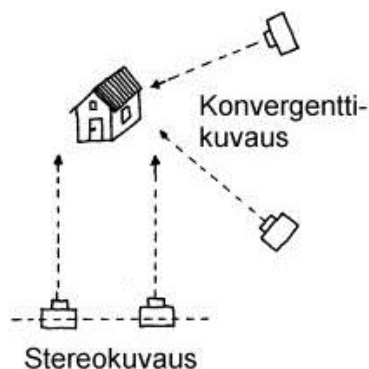
Fotogrammetrian tärkeimpiä matemaattisia sääntöjä on kollineaarisuusehto, jonka mukaan kohde, kohteesta otettu kuva ja kameran projektiokeskus täytyy sijaita samalla suoralla. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kameran linssisysteemin tilalle sijoitetaan piste, jonka kautta kaikki filmille tulevat valonsäteet kulkevat. Piste on nimeltään kameran projektiokeskus. Kun kaikki kuvan valonsäteet kulkevat yhden pisteen kautta, siitä seuraa, että mitä kauemmas kuvan keskipisteestä mennään, sitä viistommin kamera näkee kohteet. Tästä syystä korkeat kohteet näyttävät kallistuvan kohti kuvan ulkoreunaa. Siten kohteen yläreuna ei ole oikeasti siinä kohtaa, missä se kuvalla näyttää olevan, vaan syntyy virhettä [35]. Kuvauksen ja virheen periaate on esitetty kuvassa 2.15.



Kuva 2.15 Kollineaarisuusehto ja maastovirhe [35]

Keinotekoinen stereonäkymä luodaan ottamalla kohteesta kaksi valokuvaa eri sijainneista. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi siirtämällä kameraa kuvien ottamisen välillä tai käyttämällä kahta vähän matkan päässä toisistaan olevaa kameraa niin, että kuvilla näkyy osittain sama alue. Otetut kuvat muodostavat kolmiulotteisen vaikutelman, jota kutsutaan stereokuvapariksi. Koska kohteesta otetut kuvat ovat hieman eri kohdista, kuvissa on eroavaisuuksia. Sama kohde on toisessa kuvassa eri kohdassa kuin ensimmäisessä kuvassa. Tätä yhtenevien pisteiden välistä eroa kutsutaan parallaksiksi. Ilmiön avulla kuvista pystytään mittaamaan kohteen kolmiulotteista muotoa, kuten esimerkiksi maaston korkeuseroja [35].

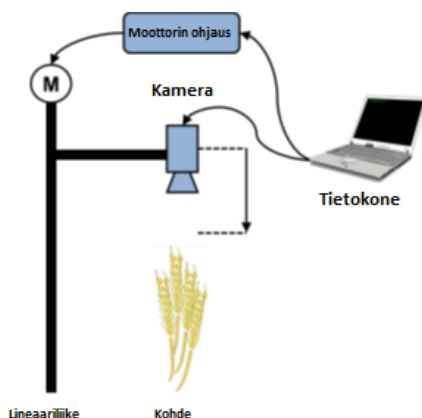
Kuvaparin ei kuitenkaan välttämättä tarvitse olla stereokuvapari. Konvergenttikuvauksessa on menetelmä, jossa kameroiden kuvausakselit eivät ole yhdensuuntaiset kuten stereokuvauksessa vaan kohde kuvataan eri puolilta niin, että kuvausakseli osoittaa aina suoraan kohteeseen. Konvergenttikuvia ei voi tarkastella kolmiulotteisesti, vaan kohde on mitattava jokaisesta kuvasta kerrallaan. Konvergenttikuvauksen etu on suurempi mittaustarkkuus. Lisäksi kamera voidaan suunnata kohdetta kohti niin, että kohde täyttää koko kuvan, jolloin koko kuvan alue saadaan paremmin hyödynnettyä. Konvergenttikuvasta voidaan mitata vain selvästi erottuvia yksityiskohtia, koska mittauskohdat on voitava tunnistaa jokaisesta yksittäisestä kuvasta erikseen. Stereokuvauksen etu puolestaan on mahdollisuus stereotarkasteluun. Kolmiulotteinen kuva on kuin maaston pienoismalli, joten se tarjoaa paljon enemmän informaatiota kuin tavallinen valokuva ja sitä on helpompi ja luontevampi tulkita [35]. Stereo- ja konvergenttikuvauksen periaatteellinen ero on esitetty kuvassa 2.16.



Kuva 2.16 Stereo- ja konvergenttikuvaus [35]

2.4.12 Muoto terävyydestä

Muoto terävyydestä -menetelmä perustuu syvyysterävyyteen. Menetelmässä hyödynnetään passiivista yksikameraista järjestelmää, joka tuottaa syvyyskartan kohteesta lukuisien kuvien avulla. Kameran ja kohteen välistä etäisyyttä muutetaan asteittain, ja jokaiselle kuva-alueen pikselille lasketaan tarkennusmitta ja määritetään mitatut maksimiarvot. Arvon mukaan määritellään pikselikohtainen kuvan syvyyskartta. Menetelmä vaatii mitaustulosten mukaisen pinnan teksturoinnin, jotta kappaleen 3D-pinta saadaan muodostettua [36, s. 3]. Menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.17.



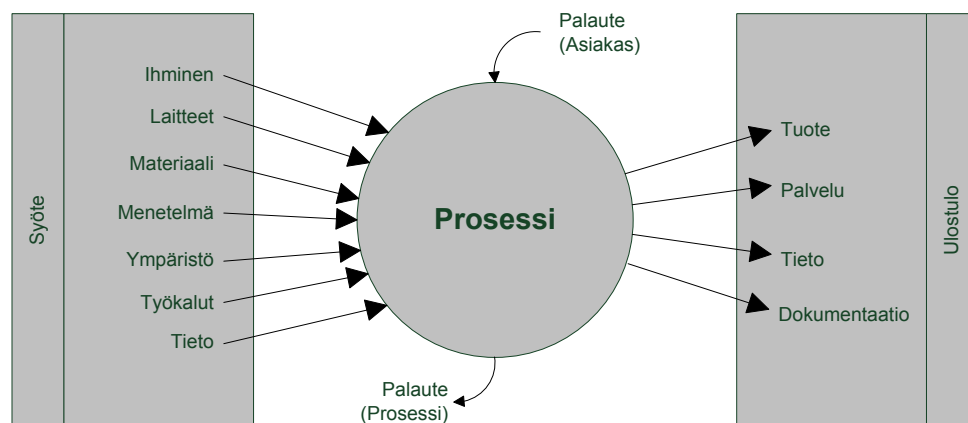
Kuva 2.17 Muoto terävyydestä -menetelmän mittaasetelma, perustuu lähteeseen [36]

Ennen kuvaamista, on järjestelmälle täytynyt tehdä säätötoimenpiteitä kuvaamisen mahdollistamiseksi. Järjestelmä täytyy kalibroida käytettyihin asetuksiin ja etäisyyteen nähdessä vääristymien välttämiseksi. Kalibrointiin voidaan käyttää sitä varten tehtyjä ohjelmistoja. Kuvan ottamisen jälkeen jokainen otettu kuva täytyy kohdistaa pikselitasolla toisiinsa oikeiden mittaustulosten saamiseksi, ja epätarkat kuvat täytyy suodattaa ohjelmallisesti pois. [36, s. 4–9]

2.5 Prosessinohjaus

2.5.1 Tilastollinen prosessinohjaus

Prosessi on toisiinsa liittyvien tapahtumien ketju kuvan 2.18 mukaisesti. Prosessin funktio on muutos, ja aika on sen tapahtumaympäristö. Tuotantotaloudessa prosessilla tarkoitetaan toimintaa tuotteen tai palvelun aikaansaamiseksi [37]. Teolliseen valmistukseen liittyy olennaisena osana prosessin vaihtelu, joka johtuu prosessiin liittyvien tekijöiden vaihtelusta. Prosessin vaihtelua ei voida poistaa, mutta sitä voidaan tulkita, ennustaa ja hallita tilastollisin menetelmin. [38, s. 24–25]



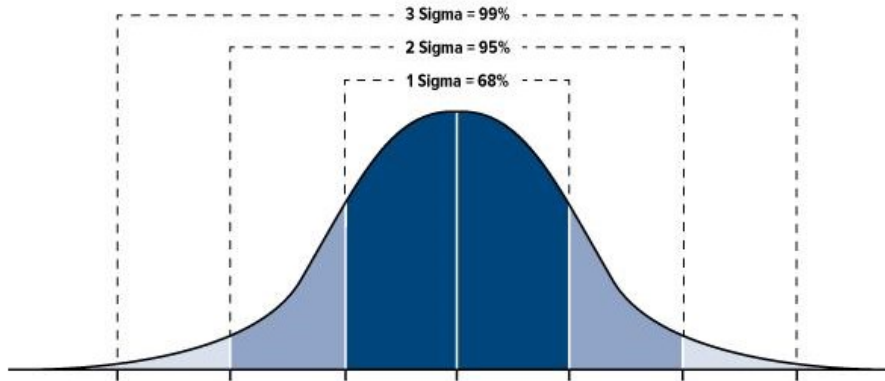
Kuva 2.18 Prosessin kaavioesitys, perustuu lähteeseen [38]

Tilastollinen prosessinohjaus eli SPC on strategia prosessissa esiintyvän vaihtelun pienentämiseksi. SPC-menetelmä ei keskity ainoastaan valmistuksen osa-alueelle, vaan sitä voidaan soveltaa laajalti kaikessa prosessimaisessa toiminnassa. Menetelmän johtoajatus ei ole prosessin kontrolloinnin lisääminen vaan prosessin ja sitä tukevien toimintojen kehittämisen jatkuvan parantamisen muodossa siten, että kasvatetaan asiakastytyvääisyyttä ja näin organisaation menestysedellytykset parantuvat [38, s. 24–25].

Prosessin hajonnan lähteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: ulkoiset syyt, sisäiset syyt ja kohina. Ulkoiset syyt ovat prosessin ympäristössä vaikuttavia vaihtelevia tekijöitä, joilla on vaikutus prosessin lopputuotteeseen. Tällaisia tekijöitä voivat olla esimerkiksi lämpötila ja kosteus. Sisäiset syyt ovat prosessin sisällä olevien tekijöiden vaihtelua. Sisäisiä syitä voivat olla esimerkiksi koneiden ja laitteiden toistotarkkuus tai mekaaninen kuluminen. Kohina on vaihtelua, joka ei ole suoranaisesti prosessin sisäistä tai ulkoista. Valmistuvan tuotteen loppuvaihtelua kutsutaan variaatiokohinaksi [11, s. 81].

Määritelmän mukaisesti prosessi on hallinnassa, jos sen aiemman käyttäytymisen perusteella voidaan päätellä, kuinka prosessi vaihtelee lähitulevaisuudessa annettujen raja-arvojen sisällä [39, s. 6]. Tilastollinen prosessinohjaus perustuu normaalijakaumaan. Normaalijakauma määritellään keskiarvon ja standardipoikkeaman eli keskihajonnan avulla.

Standardipoikkeamasta käytetään yleisesti nimitystä sigma (σ). Normaalijakaumassa mitausarvot ovat jakautuneet keskiarvon molemmin puolin siten, että kummallakin puolella on yhtä paljon mitta-arvoja. Luonnolliset tapahtumat noudattavat tyypillisesti normaalijakaumaa tai ovat hyvin lähellä sitä. Normaalijakauman tiheysfunktio on jatkuva käyrä, joka muodostaa kellomaisen kuvion. Käyrän ja x-akselin väliin jäävä pinta-ala on arvoltaan yksi. Käyrän korkeus ja leveys riippuu keskihajonnasta [15, s. 185]. Kuvassa 2.19 on esimerkki normaalijakaumasta.



Kuva 2.19 Mittaustulosten jakautuminen normaalijakaumassa [40]

Perinteisesti valmistettaville tuotteille on määrätty valmistustoleranssit, jotka tuotteen tulee täyttää ollakseen vaatimusten mukainen ja toimiakseen tuotannossa. Jos määrätty toleranssi on huomattavasti tiukempi kuin prosessin luonnollinen hajonta, on todennäköistä, että virheellisiä tuotteita syntyy, vaikka jakauma olisikin keskellä toleranssialuetta [41, s. 3–5].

Satunnaismuuttuja x on normaalijakautunut parametrein μ ja σ^2 , mikäli sen tiheysfunktio on seuraavaa muotoa, jossa σ on perusjoukon keskihajonta eli standardipoikkeama, σ^2 varianssi ja μ perusjoukon keskiarvo:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad (26)$$

Jakauman keskiarvo $\mu \in R$ voidaan laskea yhtälöllä, jossa x_i on mitattu ominaisuus näytteestä i ja n näytteiden lukumäärä:

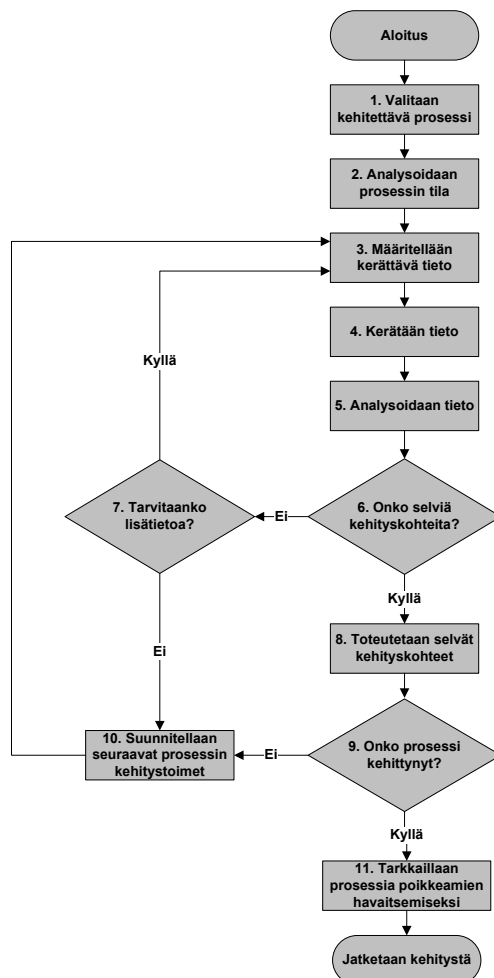
$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (27)$$

Standardipoikkeama (σ) on havaintojen poikkeama keskiarvosta, ja se voidaan esittää seuraavalla yhtälöllä:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (28)$$

Varianssi σ^2 kuvaa, kuinka paljon satunnaismuuttujan arvot keskimäärin vaihtelevat odotusarvosta. Jos arvot ovat lähellä odotusarvoa, on hajonta pientä. [39, s. 73–89][42, s. 45].

Prosessin kehitystä voidaan ohjata yksinkertaisella kysymyksellä ”voiko tämän asian tehdä paremmin” kuvan 2.20 mukaisesti. Vastaamalla kysymykseen saadaan luotua prosessin kehitystoimia ja parannusehdotuksia. Menetelmän käyttöönotto vaatii organisaatiolta jatkuvaa kehitystoimintaa, jonka avulla prosessien vaihtelua pyritään pienentämään ja tehokkuutta lisäämään. Jotta menetelmää voitaisiin tehokkaasti hyödyntää, tarvitaan resursseja toiminnan pitkäjänteiseen kehittämiseen ja muutosten implementointiin. Menetelmällä tavoitellaan ennen kaikkea pitkän ajan menestysedellytyksiä lyhyen aikavälin taloudellisten hyötyjen sijaan. SPC-menetelmä on parhaimmillaan osana yrityksen strategiaa ja siten tukemassa toiminnan kehittymistä sekä menestystavoitteiden saavuttamista. [38, s. 16]



Kuva 2.20 Prosessin kehitysvaiheet, perustuu lähteeseen [38]

Ottamalla SPC osaksi yrityksen strategiaa luodaan jatkuvan kehittämisen kulttuurin edellytykset. Joissain tapauksissa SPC:n jalkauttamisessa on korostettu menetelmän tekniikkaa strategian ja tavoitteiden sijaan, ja siksi on muodostunut kuva, että menetelmä on

byrokraattinen ja kankea ja se sisältää vaikeaselkoisia raportteja ja kaavioita. Oikein sovellettuna menetelmä on kuitenkin osa päivittäistä toimintaa, ja kaaviot ovat vain keino raportoida organisaation kehitystoimien tuloksista [38, s. 16].

Vastuu menetelmän käyttöönotosta ja ylläpidosta tulee jakaa organisaatiossa eri toiminta-alueille. Laatuosasto ei ole päävastuullinen menetelmän käyttöönotossa ja käytössä, mutta sen tulee tukea valmistusprosessin eri vaiheita ohjeistuksen, auditointien ja laadun kontrolloinnin kautta. Vastuu toiminnan organisoinnista ja resursoinnista on yrityksen johdolla, mutta pääasiallinen vastuu konkreettisen laadun tuottamisesta on valmistusprosessin operaattoreilla. Operaattoreilla täytyy olla kuitenkin käytössään riittävät työkalut laadukkaan, vaihtelultaan vähäisen prosessin hallintaan. Voidakseen hallita prosessia täytyy operaattoreiden olla tietoisia vähintään seuraavista prosessiin liittyvistä seikoista: Operaattoreiden tulee ymmärtää, että heidän operoimansa prosessi on kyvykäs tuottamaan laadultaan riittävää lopputuotetta. Operaattoreiden tulee tietää, mitkä vaatimukset prosessin on täytettävä, jotta prosessin lopputuote on vaatimusten mukainen. Operaattoreiden tulee lisäksi olla tietoisia tarvittavista korjaustoimista, jos prosessin lopputuote ei ole vaatimusten mukainen [38, s. 16–17].

Tilastollisen prosessin ohjaukseen on kehitetty seitsemän erilaista perustyökalua, joiden avulla prosessin toimintaa voidaan ohjata ja valvoa sekä ratkoa prosessissa esiin tulevia poikkeamia. Työkaluja ovat vuokaavio, syy-seurausdiagrammi, histogrammit, hajontadiagrammit, valvontakortit sekä FMEA- (engl. Failure Mode and Effect Analysis, vika- ja vaikutusanalyysi) ja pareto-menetelmä. Vuokaavion laatiminen auttaa ymmärtämään prosessin kokonaiskuvan ja kulun sekä toiminnan kannalta olennaiset kehityskohteet. Vuokaavion merkitys prosessin kuvauksessa korostuu, mitä laajempi prosessi on tutkitavana. Syy-seurausdiagrammi on visuaalinen työkalu, jota systemaattisesti käyttämällä voidaan havaita prosessin sisäisiä syy-seuraussuhteita. Kaavion avulla voidaan tarkastella, miten prosessin tulosuureet vaikuttavat prosessin lähtösuureisiin. Histogrammi on työkalu, jonka avulla voidaan visuaalisesti ja havainnollisesti esittää suurien näytemäärien sisältämää tietoa. Histogrammin avulla voidaan näytemäärästä helposti seuloa haluttujen ominaisuuksien vaikutuksia päätöksenteon pohjaksi. Hajontadiagrammin avulla voidaan tutkia kahden toisiinsa liittyvän muuttujan välistä korrelaatiota. Hajontadiagrammilla voidaan myös selvittää muuttujien keskinäinen riippuvuus ja muutoksien vaikuttavuus tarkasteltavaan kohteeseen. Valvontakortit ovat työväline prosessin heilunnan valvontaan. Valvontakorttien avulla voidaan seurata prosessin kehittymistä ja ennakoida muutoksia ennen kuin ne ovat prosessin kannalta haitallisia. FMEA-tekniikan avulla voidaan analyttisesti tutkia, tunnistaa ja eliminoida tunnetut ja potentiaaliset virheet prosessissa. Pareto-menetelmällä voidaan analysoida ja seuloa merkittävien tekijöiden vaikutukset esille suuresta havaintoryhmästä. Menetelmä on yksinkertainen käyttää, ja tulokset voidaan esittää havainnollisessa kaaviomuodossa, joka helpottaa priorisoimaan analysoitavien kohteiden vaikuttavuutta. [38, s. 19][43, s. 91–97]

2.5.2 Prosessin suorituskky

Toleranssivaatimuksia sisältävän prosessin suorituskkyä voidaan mitata ja kuvata tunnuslukujen avulla. Maksimisuorituskky (C_p) ja suorituskkyluku (C_{pk}) voidaan laskea vain prosesseille, jotka ovat hallinnassa ja joiden tulokset muodostavat normaalijakauman. Maksimisuorituskky kertoo, kuinka suorituskkyinen prosessi on toleransseihin nähden. Toleranssialue jaetaan kuusinkertaisella prosessin hajonnan estimaatilla (σ), joka kattaa 99,73 prosenttia prosessin vaihtelusta ja vastaa normaalia kolmen sigman valvontarajojen väliä keskiarvoon nähden. Maksimisuorituskkyyen kaava ei ota huomioon vaihtelun sijaintia toleranssialueeseen nähden. Maksimisuorituskkyyen laskentakaavassa USL on ylätoleranssiraja ja LSL alatoleranssiraja:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (29)$$

Kun prosessin vaihtelua halutaan peilata toleranssiin nähden, on otettava käyttöön epäkeskeisyyden korjauskerroin (k). Kun kyseessä on kaksipuolinen toleranssi, korjauskerroin lasketaan kaavalla, jossa T on prosessin tavoitekeskiarvo ja \bar{x} on prosessin mittaus tulosten keskiarvo:

$$k = \frac{T - \bar{x}}{\frac{1}{2}(USL - LSL)} \quad (30)$$

Kertoimen k avulla voidaan laskea prosessin suorituskkyluku (C_{pk}):

$$C_{pk} = (1 - k)C_p \quad (31)$$

$C_{pk} < 1,00$	Prosessin tilanne on heikko, jatkuvia toleranssin ylityksiä
$C_{pk} = 1,00-1,33$	Prosessin tilanne on huono, toleranssiylityksiä tapahtuu helposti
$C_{pk} = 1,33-1,50$	Prosessin tilanne on kohtuullinen, pienet muutokset mahdollisia
$C_{pk} > 1,50$	Prosessin tilanne on hyvä, pienet muutokset havaitaan herkästi

Prosessit voidaan jakaa eri luokkiin suorituskkyyen mukaan. Perusperiaate prosessin suorituskkyyelle on, että C_{pk} on suurempi kuin 1,33. Suorituskkyyttömässä prosessissa pyritään ensin pienentämään vaihtelua, minkä jälkeen prosessi ohjataan toleranssialueen keskelle. Tämän jälkeen prosessia kehitetään jatkuvan parantamisen työkaluilla. [11, s. 98–99][15, s. 195–198]

Koneen maksimisuorituskkyluku (C_m) kuvaa prosessin toistettavuutta tilanteessa, jossa kaikki muut vaihtelun lähteet on suljettu mahdollisimman tehokkaasti pois. Jotta suorituskkyyen mittaaminen olisi mahdollisimman luotettavaa, tehdään mittaus lyhyellä aika-

välillä. Määrittämisen aikana koneelle ei tehdä normaalista tuotannosta poikkeavia säätötoimenpiteitä ja koneenkäyttäjä on yksi ja sama henkilö. Mittaustuloksia tulee olla vähintään 50. Maksimisuorituskykyluku lasketaan kaavalla, jossa $\hat{\sigma}_t$ on prosessin hajonnan estimaatti:

$$C_m = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}_t} \quad (32)$$

Koneen suorituskykyluvussa (C_{mk}) huomioidaan vaihtelun sijainti tavoitteeseen nähden. Koneen suorituskykylukua voidaan arvioida seuraavasti:

$$C_{mk} = \left(\frac{USL - \bar{x}}{3\hat{\sigma}_t}; \frac{\bar{x} - USL}{3\hat{\sigma}_t} \right) \quad (33)$$

$C_{mk} < 1,33$ Laaduntuottokyky on heikko, ei voida hyväksyä

$C_{mk} = 1,33 - 1,67$ Laaduntuottokyky on mahdollisesti riittävä, mutta arvioitava

$C_{mk} > 1,67$ Laaduntuottokyky on riittävä

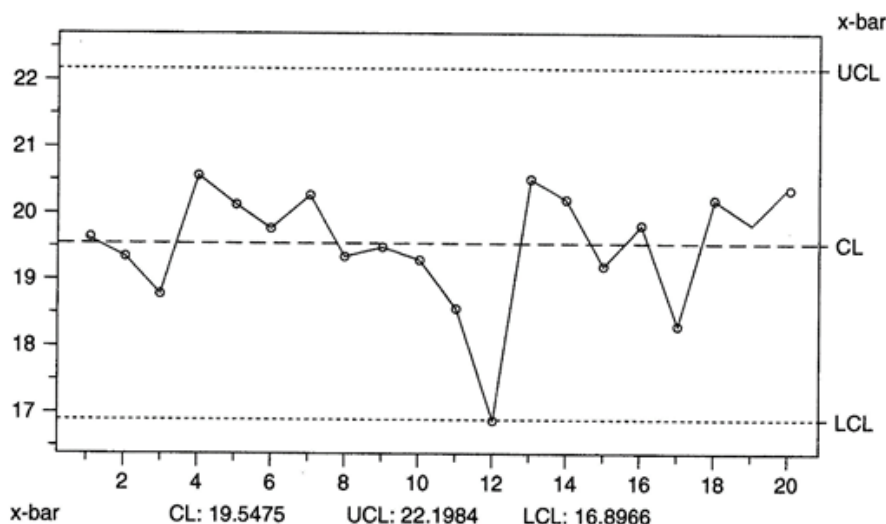
Koneen suorituskyvyn raja-arvot ovat tiukemmat kuin prosessin vastaavat arvot, mikä johtuu prosessin laajemmasta vaihtelupohjasta. [15, s. 200]

2.5.3 Valvontakortit

Valvontakortit on kehitetty työkaluksi prosessinvaihtelun pienentämiseksi, ja ne ovat olennainen osa SPC:n käytännön sovellusta. Valvontakorttien perusajatus on kerätä mitattua prosessitietoa yhteen ja sen perusteella määrittää prosessin tilastollinen suorituskyky sekä esittää se graafisessa muodossa ajan funktiona. Korttityyppejä on käytössä useita erilaisia eri käyttötarkoituksiin, mutta perusajatus kaikissa on sama: korttiin merkitään mittaustulokset, joista johdetaan graafinen esitys. Graafisen esityksen avulla voidaan kuvata prosessin tilaa ja ohjata prosessia. Perinteisesti prosessiin vaikuttaa satunnaisvaihtelu eli kohina, jota kutsutaan myös vaihtelun yleiseksi syyksi, sekä erilaiset erityisyyt, jotka eivät lukeudu prosessin kohinaan. Kun prosessiin vaikuttaa ainoastaan yleinen syy, on kyseessä tilastollisesti hallittu prosessi, jolloin prosessi käyttäytyy myös ennustettavasti. Kun prosessi on vakaa, sen keskiarvo ja vaihtelu säilyvät lähes muuttumattomina [11, s. 82–84][12, s. 192–194].

Valvontakortteihin liittyvät olennaisena osana prosessin valvontarajat. Rajojen ylittyminen on viesti erityisyyden esiintymisestä prosessissa ja informaatio prosessin ohjaajalle, että prosessi ei ole hallinnassa ja prosessiin on vaikuttanut tekijä, joka poikkeaa tilastollisesta todennäköisyydestä. Perinteisesti valvontarajat määritetään keskiarvon kummallekin puolelle kolminkertaisen hajonnan estimaatin mukaan. Tällöin valvontarajojen väli kattaa 99,73 prosenttia normaalisti odotettavissa olevista havainnoista. Kuvassa 2.21 on

esimerkki normaalijakautuneen x -kortin mitattujen näytteiden vaihtelusta graafisena esityksenä valvontarajoihin. Keskilinja (CL, centerline) on mitattujen näytteiden alaryhmien keskiarvojen (\bar{x}) keskiarvo ($\bar{\bar{x}}$). Ylävalvontaraja UCL (upper control limit, ylävalvontaraja) on sijoitettu $\bar{\bar{x}} + 3\hat{\sigma}$ etäisyydelle keskiarvosta $\bar{\bar{x}}$. Myös alavalvontaraja LCL (lower control limit, alavalvontaraja) sijaitsee $\bar{\bar{x}} - 3\hat{\sigma}$ etäisyydellä keskiarvosta $\bar{\bar{x}}$. [11, s. 82–84][12, s. 232–257][15, s. 208–212]



Kuva 2.21 Valvontakortin graafinen esitys [12]

Valvontarajat voidaan jakaa viiteen eri ryhmään käyttötarkoituksien mukaan: raportointivalvontarajat, tuotantovalvontarajat, jatkuvan parantamisen valvontarajat, apuvalvontarajat ja pre-control-valvontarajat. Raportointivalvontarajat ovat ensimmäiset valvontarajat, jotka muodostetaan, kun käytettävissä on riittävästi mittaustuloksia (vähimmäismäärä 20). Rajat auttavat tutkimaan, kuinka prosessi on käyttäytynyt, kun mukana on kaikki prosessista ja mittausjärjestelmästä tuleva vaihtelu. Tuotantovalvontarajat laaditaan, kun erityisyys on poistettu ja prosessi on hallinnassa. Tuotantovalvontarajat ovat pysyviä ja muuttuvat vain prosessin muuttuessa. Jatkuvan parantamisen valvontarajat vastaavat tuotantovalvontarajoja, mutta kyseisiä rajoja päivitetään aktiivisesti. Tavoitteena on vaihtelun pieneneminen. Apuvalvontarajat laaditaan valvontakortin mittaustulosten helpottamiseksi. Apuvalvontarajat voivat olla esimerkiksi tavoitteellisia prosessin vaihtelun rajoja. Pre-control-valvontarajoilla toleranssialueesta rajataan alin ja ylin neljännes pysäytysrajoiksi, jolloin prosessi pysäytetään rajan ylittyessä ja etsitään prosessiin vaikuttava erityisyys [15, s. 208].

Mitattavan datan tulee kuvata mahdollisimman hyvin valvottavaa prosessia tai sen osaa. Mitattava data tulee olla helposti saatavissa, ja mittausprosessin tulee olla luotettava. Virheellinen mittaustieto aiheuttaa virheellisen prosessinohjauksen, jota tulee luonnollisesti välttää kaikin mahdollisin keinoin. Kun prosessin mittauspiste sijoitetaan mahdollisimman lähelle prosessin seurattavaa vaihetta, poikkeamiin voidaan puuttua heti ja näin minimoidaan hylkykappaleiden määrä ja kustannukset. [11, s. 82–84][12, s. 232–257][15, s. 212]

Mitattava data voidaan luokitella kahteen eri kategoriaan: muuttujatietoon ja ominaisuustietoon. Muuttujatietoa ovat mittalaitteilla mitattavat tuotteen piirteet, kuten paino, aallonpituus tai paine. Muuttujatietoa voidaan mitata liukuvalla asteikolla, parhaimmillaan reaaliaikaisena mittauksena. Ominaisuustieto on tuotteesta määriteltävä mittalukema, jolla voidaan päätellä, onko tuote spesifikaation mukainen. Ominaisuustiedot voidaan jakaa kahteen kategoriaan sen mukaan, kuinka tieto luokitellaan. Tieto voi olla kyllä/eitietoa tai lukumääräistä, esimerkiksi tuotevirheiden määrä analysoitavassa kappaleessa. Valvontakortin valintaan vaikuttavat muun muassa näyte-erän koko ja valmistuserien keskinäinen riippuvuus [12, s. 231–232]. Tässä työssä käsitellään tuotteiden muuttujatietoihin liittyviä valvontakortteja.

Prosessin mittaustulosten käyttäytymisen tulkinta on olennainen osa prosessin hallintaa ja kehittämistä. Prosessin voidaan katsoa olevan hallinnassa, jos yksikään havainto ei ole yli valvontakortin valvontarajojen ja erityisyyksi tulkittavia tilanteita ei synny, kaksi kolmasosaa mittaustuloksista sijaitsee valvontarajojen välin keskeisimmällä kolmanneksella ja keskiarvon ylä- ja alapuolella sijaitsee suunnilleen sama määrä tarkastelujakson mittaustuloksia [15, s. 312].

Prosessi, joka ei ole hallinnassa, voidaan myös tulkita valvontakortin kuvaajasta. Prosessin siirtyminen valvontarajojen ulkopuolelle on merkki prosessin näytteiden keskiarvon siirtymisestä, jolloin prosessiin on voinut vaikuttaa erityisyys. Perussääntönä on, että seitsemän perättäisen näytteen sijoittuminen keskiarvon toiselle puolelle on merkki prosessin keskiarvon siirtymisestä. Seitsemän perättäisen pisteen nouseva tai laskeva trendi on merkki siitä, että prosessi ei ole enää hallinnassa ja liukuma voi johtua esimerkiksi kulumisesta tai lämpötilan muutoksesta. Jos prosessin pisteet pysyttelevät keskilinjan tuntumassa, ovat valvontarajat liian löysät. Tämä voi johtua prosessin kehittymisestä valvontarajojen määrittämisen jälkeen. Toistuvat säännölliset prosessivaihtelut voivat taas olla merkki esimerkiksi vuorokohtaisesta vaihtelusta, jota täytyy korjata kouluttamisella [12, s. 234]. Äkillinen tason muuttuminen on merkki erityisyydestä prosessissa. Muutoksen syynä voi olla prosessiin tehty kehitystoimenpide, tai prosessissa tapahtunut odottamaton muutos, joka aiheuttaa mittaustuloksien muutoksen. Prosessin jaksoittaisuus voi olla esimerkiksi merkki prosessin kulumisesta, joka korjaantuu toimilaitteiden säännöllisellä huoltamisella. Jaksottuminen ei ole vaarallista, jos sen syyt tunnetaan. Jos jaksottumisen syyt ovat epäselviä, täytyy vaihtelun lähde selvittää ja mahdollisuuksien mukaan poistaa. Hyppivät tulokset, jotka sijoittuvat keskiarvon molemmiin puolin, ovat epätodennäköisiä ja merkki prosessista, joka ei ole hallinnassa. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että neljän-toista peräkkäisen tuloksen hyppely on raja-arvo hallitsemattomalle prosessille. SPC:n perusedellytys on, että prosessi on normaalijakautunut. [15, s. 315–323]

Jos prosessin jakauma on luonteeltaan normaalijakaumasta poikkeava, voidaan epätyypillisen jakauman olettaa aiheuttavan ongelmia prosessin käyttäytymiseen. Epätyypillinen jakauma täytyy aina huomioida prosessin valvonnassa ja kehityksessä. Tyypillisiä

normaalijakaumasta poikkeavia tilanteita ovat vino jakauma, kaksihuippuinen jakauma, tasahuippuinen jakauma ja leikkautunut jakauma [15, s. 324–325].

I-MR-kortti koostuu kahdesta kuvaajasta I (individual, yksittäinen mittaustulos) ja MR (moving range, liukuva vaihteluväli). Joissain yhteyksissä kortista käytetään myös nimitystä x/MR -kortti. I-kuvaaja kuvaa yksittäisten mittaustulosten asettumista mittausten keskiarvoon nähden ajan funktiona. MR-kuvaaja taas kuvaa peräkkäisten näytteiden liukuvista vaihteluväleistä muodostuvaa hajontaa. Käyttämällä näiden kahden kuvaajan yhdistelmää voidaan seurata prosessin keskiarvoa ja vaihtelua, kun mittaustulokset ovat yksittäisiä näytteitä eivätkä näyte-eriä. Koska mittaustulokset ovat yksittäisiä näytteitä, ei näyte-erälle voi laskea keskihajontaa. MR-kuvaajan avulla voidaan kuitenkin laskea prosessin vaihtelu peräkkäisten tai useampien näytteiden vaihteluväleistä. Korttia käytetään kohteissa, joissa ei voida hyödyntää näyte-eriä prosessin tilan valvonnassa. Tällaisia kohteita voivat olla erävalmistus, jossa näyte-erästä saadaan vain yksi näyte. Kyseessä on kertaluonteinen mittaustulos, tai näyte-erien hajonta on pieni valmistuserien väliseen hajontaan verrattuna [44].

Prosessista saatujen mittaustulosten (x_k) avulla voidaan laskea I-kuvaajan kokonaiskeskiarvo (\bar{x}) kaavalla, jossa k on yksittäisten arvojen lukumäärä:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_k}{k} \quad (34)$$

MR-kuvaajan keskiarvo (\overline{MR}) voidaan laskea liukuvien vaihteluvälien keskiarvona (MR_i), jolloin vaihteluvälejä on yksi vähemmän kuin mittaustulosten lukumäärä. [15, s. 241–242][45, s. 277]

$$MR_1 = |x_2 - x_1| \rightarrow MR_i = |x_{i+1} - x_i|, i = 1 \dots k - 1 \quad (35)$$

$$\overline{MR} = \frac{MR_1 + MR_2 + \dots + MR_{k-1}}{k - 1} \quad (36)$$

I-kuvaajan valvontarajojen (UCL_x, LCL_x) laskentaa varten tarvitaan kerroin E_2 , joka valitaan liitteen B taulukosta. Kerroin valitaan näyte-erän koon mukaan. Kun vaihteluväli lasketaan kahden peräkkäisen tuloksen erotuksena, käytetään kerrointa 2,66. [15, s. 241–242] Valvontarajat voidaan laskea seuraavilla kaavoilla:

$$UCL_x = \bar{x} + E_2 \overline{MR} \quad (37)$$

$$LCL_x = \bar{x} - E_2 \overline{MR} \quad (38)$$

MR-kuvaajalle lasketaan vain ylävalvontaraja, koska luonnollisen vaihtelun alaraja on aina nolla. Valvontarajan laskentaa varten tarvitaan kerroin D_4 , joka valitaan näyte-erän koon mukaan liitteen B taulukosta. Kun vaihteluväli lasketaan kahden peräkkäisen tuloksen erotuksena, on kerroin 3,268. [15, s. 241–242] Ylärajan laskentakaava on seuraavanlainen:

$$UCL_{MR} = D_4 \overline{MR} \quad (39)$$

Perusjoukon keskihajonnan arvio ($\hat{\sigma}$) lasketaan seuraavalla kaavalla:

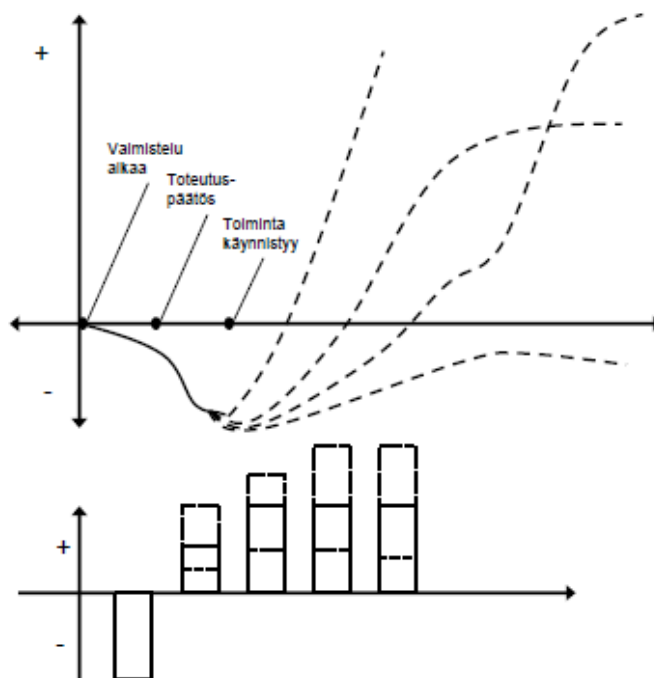
$$\hat{\sigma} = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (40)$$

Kerroin d_2 valitaan liitteen B taulukosta sen mukaan, kuinka monen arvon yli liukuva keskiarvo on laskettu [15, s. 242].

2.6 Investoinnit ja päätöksenteko

2.6.1 Investointilaskelmat

Investointi on menoerä ja merkittävä taloudellinen uhraus, jonka tulon odotusaika on pitkä kuvan 2.22 mukaisesti. Investointi voi olla rahoitus- tai reaali-investointi. Rahoitusinvestoinnissa sijoitetaan pääomaa esimerkiksi hankkimalla obligaatioita tai debenttuureja. Reaali-investoinnissa pääoma sijoitetaan tuotannontekijöiden hankkimiseen tuottojen saamiseksi. Investoinnin tulee lähtökohtaisesti aina olla kannattava, koska useasti investoinnit luovat toiminnan puitteet ja ratkaisevat siten yrityksen tulevaisuuden. Uusinvestoinneissa laajennetaan yrityksen reaali-pääomaa, kun taas korvausinvestoinnissa korvataan perinteisesti vanhentunutta kalustoa eli tuotannontekijöitä. Näkemys investointiin liittyvästä kustannuksesta tarkentuu investoinnin ja sen käytön edetessä, mutta jo investoinnin toteutuksen aikana on syytä seurata kustannusten ja tuottojen toteutumista. [46, s. 195][47, s. 178]



Kuva 2.22 Investoinnin kassavirta [47]

Investoinnin huolellinen suunnittelu ja kannattavuuden tutkiminen ovat avainasemassa uusien tuotannon tekijöiden hankinnassa. Investoinnin soveltuvuus yrityksen strategiaan on seikka, jota ei voi yli-korostaa. Investoinnin kokoluokan on oltava sopusoinnussa yrityksen kokoon nähden. Liian suuri investointi voi epäonnistuessaan aiheuttaa suurta taloudellista haittaa yrityksille ja jopa vaarantaa koko yrityksen tulevaisuuden. Ennen investointipäätöstä on selvitettävä tuotto-, kustannus- ja markkinatilanneodotukset sekä investoinnin perushankintakustannus, jäännösarvo, investoinnin vaatima aika ja laskentakorkokanta. Investoinnin edullisuuteen vaikuttaa lisäksi myös muita tekijöitä, joilla on merkitystä investointilaskelmia tehtäessä: juoksevasti syntyvät tuotot eli kustannussäästöt, juoksevasti syntyvät kustannukset ja investoinnin pitoaika. Näiden saatujen tietojen pohjalta voidaan laatia investoinnin kannattavuuslaskelmat. Investointilaskelmien tekoon on useita yleisesti tunnettuja menetelmiä. Peruslaskentamenetelmiä ovat nykyarvomenetelmä, annuiteettimenetelmä ja sisäisen korkokannan menetelmä. Yksinkertaistettuja menetelmiä ovat pääoman tuottoastemenetelmä ja takaisinmaksuajan menetelmä. [46, s. 196][48, s. 1–25]

Nykyarvomenetelmässä investoinnin tuotot ja kustannukset diskontataan nykyhetkeen valittu laskentakorkokanta huomioiden. Investointi on kannattava, kun sen nykyarvo on positiivinen. Positiivinen nykyarvo tarkoittaa, että investoinnin nettotuotto on suurempi kuin hankintakustannukset ja vaadittu tuottovaatimus yhteensä. Menetelmä ei ota kantaa tulevaisuuden ennakoituihin tuottoihin, kuluihin, inflaatioon tai deflaatioon liittyviä epävarmuustekijöitä, jotka kasvavat ennustejakson aikajänteen pidentyessä. [46, s. 202–203]

2.6.2 Analyttinen hierarkiaproessi

Nopeasti tapahtuva teknologinen kehitys vaatii valmistavan teollisuuden yrityksiltä nopeaa reagointia sekä valistunutta ja kokonaisvaltaista näkemystä, kun päätetään strategisesti tärkeistä lähitulevaisuuden tuotekehitys- ja tuotantomenetelmistä. Päätösten tekeminen on monimutkainen ja vaativa prosessi, jossa täytyy ymmärtää teknologista kehitystä pitkäjänteisesti ja laaja-alaisesti. [49, s. 2]

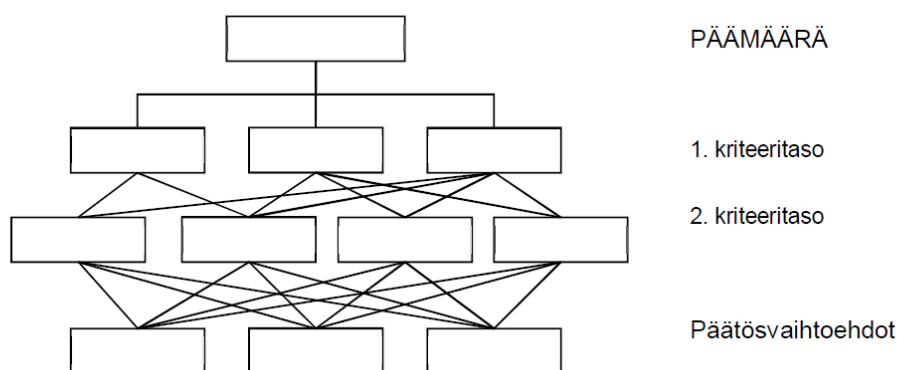
Tyypillisesti kyvyt mallintaa kompleksista ongelma- tai ilmiökokonaisuutta ovat rajalliset. Ilmiöstä pyritään rakentamaan malli sen mukaan, mitkä asiat ovat mitattavissa, mutta jätetään pois asioita, joita ei voida esittää mitattavassa muodossa. Kun mallia yksinkertaistetaan, jätetään helposti pois päätöksen kannalta olennaisia tekijöitä. Lähtökohtaisesti laskentamallien tulisi sisältää myös kaikki ei-mitattava data, jos se on päätöksen kannalta merkityksellistä. Päätökset on aina voitava perustella, mutta ongelmaa ei aina voi tai saa yksinkertaistaa. Ongelma on kuitenkin mahdollista jäsentää osiksi ja selvittää järjestelmällisesti, miten osat vaikuttavat toisiinsa ja kokonaisuuteen [50, s. 1].

Analyttinen hierarkiaproessi (AHP) on päätöksenteossa käytettävä menetelmä, jonka avulla saadaan malli jäsentymättömästä ongelmasta. AHP-menetelmän perusajatuksena on, että järjestelmän rakennetta ja toimintoja ei voi erottaa toisistaan vaan sekä rakennetta

että toimintoja tarkastellaan samanaikaisesti. Menetelmän avulla ongelma jäsennetään osiensa rakenteena ja näiden välisinä suhteina, jotka kuvataan hierarkioiden avulla. Menetelmässä voidaan erottaa seuraavat kolme vaihetta:

1. Jaetaan ongelma osiin ja kuvataan hierarkian avulla.
2. Arvioidaan jokaisen hierarkiatason osia pareittain keskenään, mitataan vaihtoehtojen preferenssit ja lasketaan painoarvot.
3. Lasketaan eri vaihtoehtojen paremmuusjärjestys. [50, s. 1]

Hierarkiamallin avulla ongelma voidaan jäsentää hallittavan kokoisiin osiin. Mallin rakentaminen aloitetaan siitä, mitkä ovat ongelman tai tehtävän päätöksen yleiset tavoitteet. Sen jälkeen ongelma jaetaan osiin ja kuvataan portaittain kuvan 2.23 mukaisesti. Hierarkia voidaan rakentaa sekä ylhäältä alas että alhaalta ylös. Jokaisella hierarkian tasolla ovat keskenään vertailukelpoiset asiat. Alin taso muodostuu kriteereistä, joiden suhteen päätösvaihtoehtoja vertaillaan [50, s. 1][51, s. 1].



Kuva 2.23 Hierarkian rakenne-esimerkki [50]

Parivertailun avulla voidaan selvittää hierarkiatasojen elementtien vaikutus toisien hierarkiatasojen elementteihin ja siten lopulta päämäärään. Vertailua varten laaditaan matriisi, jonka avulla voidaan kuvata elementtien välisiä vaikutussuhteita. Elementin vaikutussuhde itseensä on 1, ja seuraavat vaikutustasot ovat arvoltaan 3, 5, 7 ja 9, mikä kuvastaa elementtien välistä suhdetta.

A ja B ovat yhtä tärkeitä = 1

A on vähän tärkeämpi kuin B = 3

A on jonkin verran tärkeämpi kuin B = 5

A on huomattavasti tai erittäin paljon tärkeämpi kuin B = 7

A on absoluuttisen tärkeä verrattuna B:hen = 9

Numerot 2, 4, 6 ja 8 toimivat välitasoina tarvittaessa.

Matriisin elementeille määritellään painoarvot käyttämällä ominaisvektorimenetelmää, jossa λ_{max} on matriisin suurin reaalinen ominaisarvo. Painoarvojen summan on oltava 1. Tästä syystä ratkaistu ominaisvektori on normalisoitava jakamalla painoarvot (w) summallaan, jotta voidaan täyttää ehto:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (41)$$

Matriisin avulla saatuja painoarvoja voidaan tämän jälkeen käyttää vaihtoehtojen vertailussa aivan kuten missä tahansa muussa painoarvoihin perustuvassa vertailussa. [49, s. 8][50, s. 4]

Parivertailun on oltava yhdenmukainen. Yhdenmukaisuusindeksi (Consistency Index, *CI*) saadaan laskettua kaavalla, jossa otetaan huomioon matriisin suurin ominaisarvo ja matriisin koko n :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (42)$$

$$CR = \frac{CI}{CR} \quad (43)$$

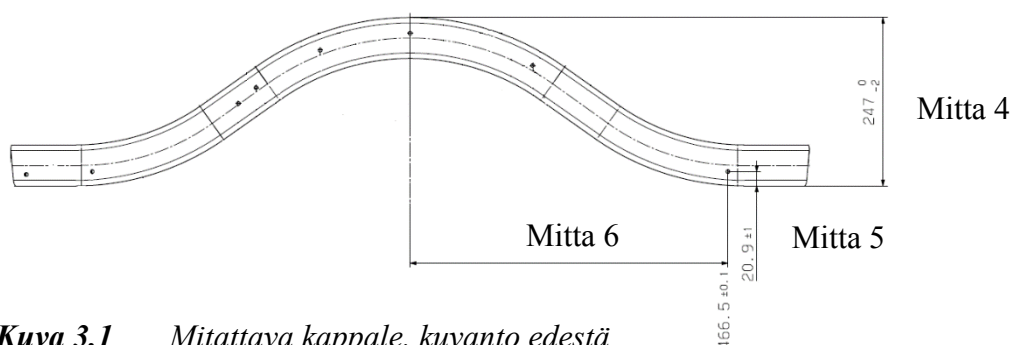
Kun tulos jaetaan edelleen satunnaisluvuilla generoidusta käänteislukumatriisista laskettulla satunnaisindeksillä (*RI*, Random Index), saadaan konsistenssisuhde (Consistency Ratio, *CR*). Konsistenssisuhteen hyväksyttävä taso on 0,10 tai vähemmän. [50, s. 4][51, s. 3]

3 MITTAUSMENETELMIEN JA -TULOSTEN ESITELY

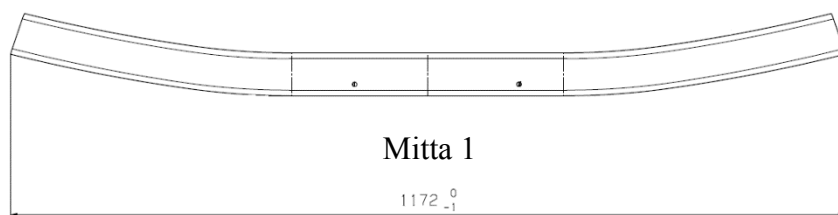
3.1 Mitattava kappale

Mittauksissa käytettäväksi koekappaleeksi valikoitui sarjatuotannossa oleva turvaohjaamon rungon runkoputki. Kyseinen koekappale valittiin, koska siinä hyödynnetään solun päävalmistusmenetelmiä ja lisäksi kappale on geometrialtaan haastava, joten vaihtelun mahdollisuus on suuri. Kappale on olennaisessa osassa ohjaamon rungon valmistuksessa, ja kappaleen mittavaihtelu aiheuttaa esiintyessään tuotannollisia haasteita. Vuositasolla kyseistä nimikettä valmistetaan noin 6 500 kappaletta. Koekappaleen lisäksi solulla valmistetaan myös 19:ää muuta nimikettä.

Kappale valmistetaan 60 x 60 x 4 -putkiprofiiliihioista. Materiaali on lujuusluokaltaan S355:n mukainen, ja profiiliihio on valmistettu standardin SFS-EN 10219-2 mukaisesti. Kuvissa 3.1 ja 3.2 on esitetty mitattavan kappaleen muoto ja analysoitavat mitat.



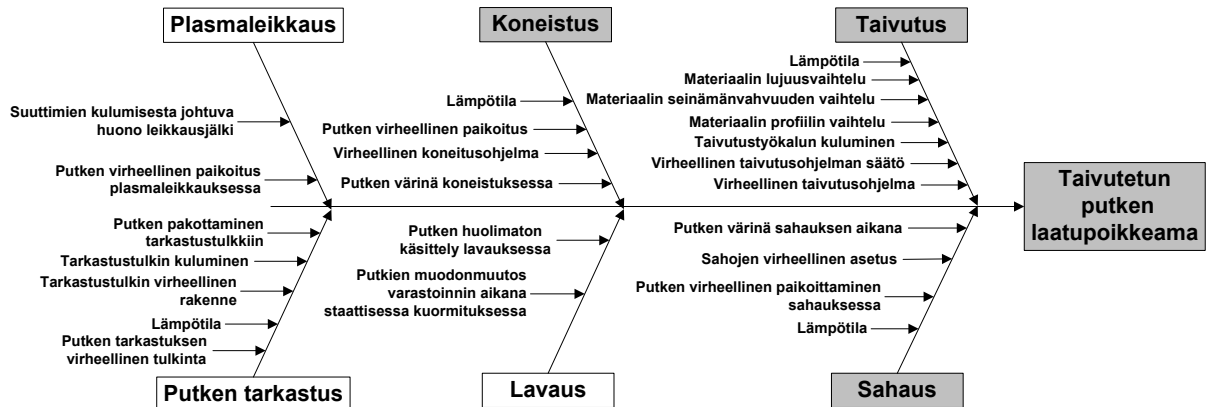
Kuva 3.1 Mitattava kappale, kuvanto edestä



Kuva 3.2 Mitattava kappale, kuvanto päältä

Mittauksissa jokaisesta kappaleesta otettiin yhteensä 14 mittaa kappaletta kohden. Lisäksi kirjattiin valmistus- ja mittauslämpötila. Kappaleiden mitatuista mitoista neljä valittiin analysoinnin kohteeksi. Olemassa olevaa mittausdataa voidaan hyödyntää jatkotutkimuksissa tarvittaessa. Neljän valitun mitan kautta pyrittiin analysoimaan sekä mittausmenetelmän mittausepävarmuutta että valmistussolun päätyövaiheiden kyvykkyyttä. Taivutettujen kappaleiden mahdollisia virhelähteitä on kartoitettu kokemuseräisesti kuvassa 3.3.

Näistä valmistussolun sisäisistä oletetuista virhelähteistä osa pystyttiin todentamaan mittauksien avulla.



Kuva 3.3 Taivutetun kappaleen laatupoikkeama, syy-seurausdiagrammi

3.2 Käytössä olevan mittausmenetelmän mittausepävarmuuden todentaminen

Mittauksiin käytettävän laitteiston ja menetelmän kokonaismittausepävarmuuden todentamiseen käytettiin Gage R&R -menetelmää. Mittausjärjestely muodostui Faro Titanium -käsivarsimittalaitteesta, Powerinspect-mittausohjelmasta, mittajigistä ja teräksisestä mittauspöydästä kuvan 3.4 mukaisesti. Mittalaitteen mittaustarkkuudeksi on edellisen kalibroinnin yhteydessä määritetty $\pm 0,072$ mm liitteen C mukaisesti.

Mittausta varten suunniteltu mittajigi mahdollistaa kappaleen mittaamisen luonnollisessa asennossaan ja kappaleen luokse päästävyiden kaikista suunnista. Mittajigi tukee kappaletta Z-suunnasta kahdella pisteellä, kappaleen päiden alapinnalta. Lisäksi mittajigi tukee kappaletta takapinnalta X-suunnasta kolmella pisteellä. Kappaleen asemointia varten mittajigissä on vielä erillinen vastin, joka mahdollistaa kappaleen asemoinnin myös Y-suunnassa. Mittajigin tukipisteet on sijoitettu siten, että ne eivät aiheuta kappaleeseen muodonmuutosta ja ovat mahdollisimman lähellä kappaleen toiminnallisia pisteitä hitsaustyökaluihin verrattuna. Mittajigissä käytetyn painimen tehtävä on estää tahattomat kappaleen liikkeet mittauksen aikana. Painin on säädetty siten, että se vastaa elastisella kumipuskimella kappaleen pintaa ja varmistaa, että kappale on vastinta vasten. Painimen liikevara on kuitenkin rajoitettu siten, että kappaleeseen kohdistuva voima on mahdollisimman pieni ja siten osan taipuminen on nimellistä. Mittajigi on kiinnitetty teräksiseen mittapöytään ruuvipuristimin, ja jigin alapinnalla on säätöruuvit, joilla jigi on mahdollista säätää vakaasti pöytää vasten ja estää jigin rungon vääntymät.



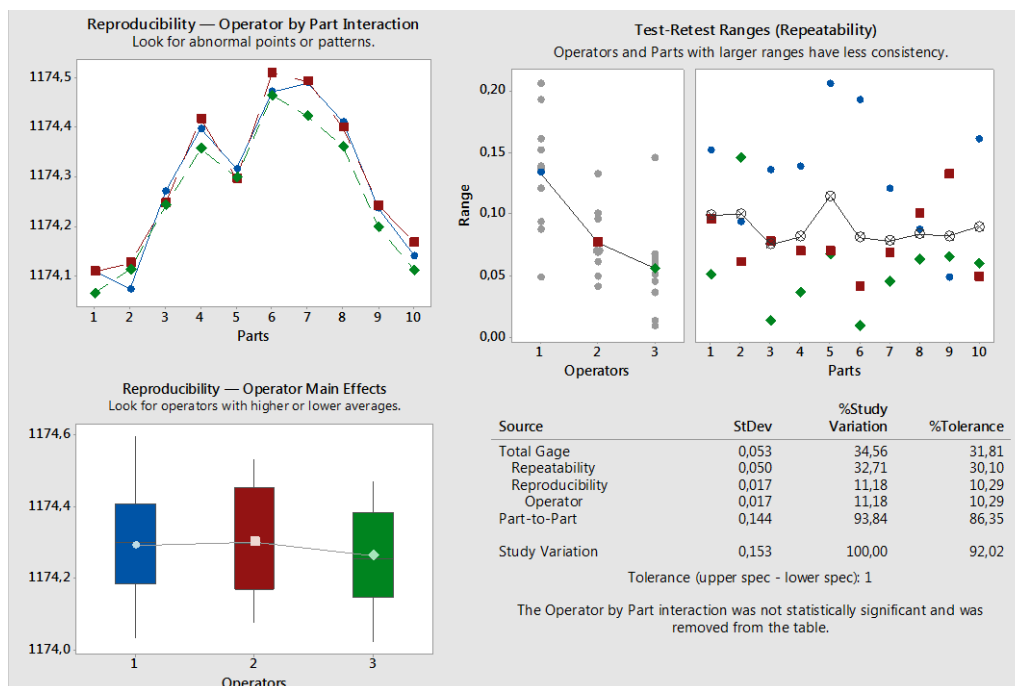
Kuva 3.4 Mittalaitteasettelu

Testiä varten valittiin satunnaisesti kymmenen näytekappaletta kuudenkymmen näytteen joukosta. Näytekappaleet merkittiin järjestysnumeroilla siten, että järjestysnumero ei ollut mittajien nähtävissä mittauksen aikana. Mittaukset suoritettiin kolmen mittajan toimesta, joilla kaikilla on pitkä kokemus käsivarsimittalaitteen käytöstä. Mittaukset tehtiin kahden päivän aikana siten, että jokainen mittaja suoritti kolme erillistä mittaussykliä. Sama mittaja ei tehnyt peräkkäisiä mittaussyklejä, vaan mittaja vaihtui aina syklin päätyttyä. Näytekappaleet valittiin satunnaisessa järjestyksessä mitattavaksi. Mitattavat kappaleet kiinnitettiin aina kyseisen kappaleen piirteistä mittausohjelmaan, ja näin pyrittiin välttämään kappaleen asemoinnista muodostuvia virheitä. Kappaleen mittauksia varten tehtiin oma mittausohjelma, joka ohjasi mittajia tekemään mittaukset saman työkierron mukaisesti. Mittauksista pidettiin erillistä mittauspöytäkirjaa, johon kirjattiin myös mitatuoneen lämpötila jokaisen näytekappaleen mittauksen aikana. Jokaisesta mitatusta näytteestä tallentui erillinen mittapöytäkirja automaattisesti mittalaitteen mittausohjelmistoon, josta tiedot saatiin siirrettyä analysoitaviksi.

Tiedon analysointiin käytettiin Minitab 18 -ohjelmistoa, jota hyödyntämällä mekaaninen laskenta ja analysointi nopeutui huomattavasti. Kappaleelle määritellyt mitat 1, 4, 5 ja 6 kuvaavat jokainen solun eri konevaiheen kykyä tuottaa vaatimusten mukaisia kappaleita. Mitta 1 on kappaleen kokonaispituus, joka muodostuu kappaleen sahausvaiheessa, kun kappale katkaistaan ahiomitasta toiminnalliseen mittaan. Mitta 4 on kappaleen taivutuksen kokonaiskorkeus, joka muodostuu taivutusvaiheessa. Mitta 5 on koneistuksen Z-

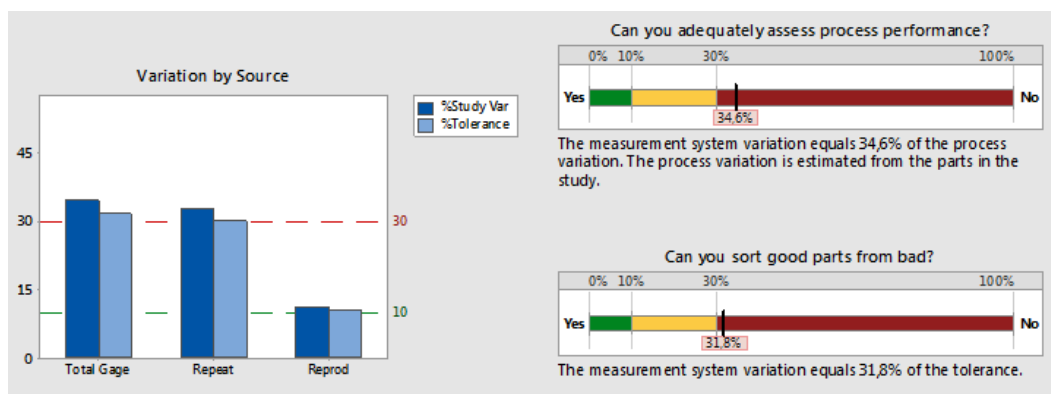
suunnan seurantamitta, joka muodostuu robotisoidun koneistuksen yhteydessä. Mitta 6 on koneistuksen Y-suunnan seurantamitta, joka myös muodostuu robotisoidun koneistuksen yhteydessä. Kaikkien mittojen nominaalit ja toleranssit on esitetty taulukossa 3.1. Jokaisesta valitusta mitasta analysoitiin toistettavuus ja uusittavuus, joiden avulla saadaan määriteltyä mittausepävarmuus. Näytevaihtelun ja mittausepävarmuuden avulla voitiin määritellä kokonaisvaihtelu. Lasketut arvot suhteutettiin kokonaisvaihteluun ja käytettävissä olevaan toleranssiin. Kaikkien mittojen lasketut arvot on esitetty taulukossa 3.1. Kuvassa 3.5 on esitetty yksityiskohtainen raportti mitta 1:n mittaus- ja laskentatuloksista.

Mitta 1:n osalta uusittavuuden eli mittaajasta johtuvan vaihtelun osuus kokonaisvaihtelusta on 11,18 prosenttia kokonaisvaihtelusta ja 10,29 prosenttia toleranssista. Pelkästään uusittavuus ylittää suorituskvyytään hyvän mittausjärjestelmän rajan, eli mittausepävarmuus < 10 prosenttia käytettävissä olevasta toleranssista. Uusittavuus on kuitenkin hyväksyttävällä tasolla, ja tulosta voidaan hyödyntää, kun asia tiedostetaan. Uusittavuuden vaihtelu on kaikilla mittaajilla mittauksissa hyvin samankaltainen, enintään 0,28 mm. Mittaajakohtaisen vaihtelun keskiarvon sijainnin poikkeama on vain 0,04 mm. Toistettavuus eli laitevaihtelu mitta 1:n osalta on suorituskvyytään huomattavasti heikompi. Toistettavuuden osuus kokonaisvaihtelusta on 32,71 prosenttia ja toleranssista 30,10 prosenttia. Toistettavuus yksin ylittää jo hyväksyttävän mittausepävarmuuden rajan, eli mittausepävarmuus < 30 prosenttia käytettävissä olevasta toleranssista. Toistettavuuden vaihtelu on niin suuri, että tulosta ei voi enää pitää luotettavana ja saadut tulokset ovat vain suuntaa-antavia. Mittaajien välinen suurin vaihtelu on 0,196 mm, ja yksittäisen mittaajan mittaustulosten suurin vaihtelu on 0,157 mm. Vaihtelut eivät ole nominaalimitaan nähden suuria, mutta toleranssiin nähden merkittäviä. Uusittavuuden ja toistettavuuden yhteenlaskettu mittausepävarmuus on 34,56 prosenttia kokonaisvaihtelusta ja 31,81 prosenttia toleranssista. Saadut tulokset eivät täytä mittausmenetelmälle asetettuja vaatimuksia. Mittaustulokset ovat siten vain suuntaa-antavia. Näytevaihtelun ja mittausepävarmuuden muodostama kokonaisvaihtelu on 92,02 prosenttia toleranssista.



Kuva 3.5 Gage R&R, raportti mitta 1, vaihtelun osatekijät

Tulosten mukaan mittaa 1 ei voida arvioida kyseisellä mittaussysteemillä luotettavasti ja menetelmän herkkyys ei riitä erottamaan laadultaan hyviä ja huonoja kappaleita toisistaan. Yhteenvedo ja analyysi tuloksista mitta 1:n osalta on esitetty kuvassa 3.6.



Kuva 3.6 Gage R&R, raportti mitta 1, vaihtelun yhteenvedo

Mittojen 4, 5 ja 6 osalta tilanne on huomattavasti heikompi mittaan 1 verrattuna. Kaikissa lopuissa mitoissa toleranssin hyväksyttävän vaihtelun raja ylitetään moninkertaisesti. Tämä tarkoittaa, että työssä esitettyjä mittaustuloksia ei voida pitää minkään kappaleelle tehdyn mittauksen osalta luotettavana vaan vain suuntaa-antavina. Koska mittaukset vaativat runsaasti resursseja ja aikaa, mittauksia ei lähdetty tämän työn puitteissa uusimaan.

Taulukko 3.1 Gage R&R, mitat 1–4, vaihtelun yhteenveto

Measurement		Nominal	Tolerance	StDev	% Study Variation	%Tolerance
Mitta 1	Total Gage	1172,00	+0 -1	0,05	34,56	31,81
	Repeatability			0,05	32,71	30,10
	Reproducibility			0,02	11,18	10,29
	Operator			0,02	11,18	10,29
	Part-topart			0,14	93,84	86,35
	Study Variation			0,15	100,00	92,02
Mitta 4	Total Gage	247,00	+0 -2	0,78	94,72	232,91
	Repeatability			0,71	86,74	231,28
	Reproducibility			0,31	38,06	93,57
	Operator			0,31	38,06	93,57
	Part-topart			0,26	32,05	78,81
	Study Variation			0,82	100,00	245,88
Mitta 5	Total Gage	20,90	+1 -1	0,28	79,67	83,11
	Repeatability			0,20	56,55	59,00
	Reproducibility			0,20	56,11	58,54
	Operator			0,20	56,11	58,54
	Part-topart			0,21	60,44	63,06
	Study Variation			0,35	100,00	104,33
Mitta 6	Total Gage	466,50	+0,1 -0,1	0,05	46,73	139,73
	Repeatability			0,04	38,18	114,16
	Reproducibility			0,03	26,95	80,57
	Operator			0,03	26,95	80,57
	Part-topart			0,09	88,41	264,34
	Study Variation			0,10	100,00	299,00

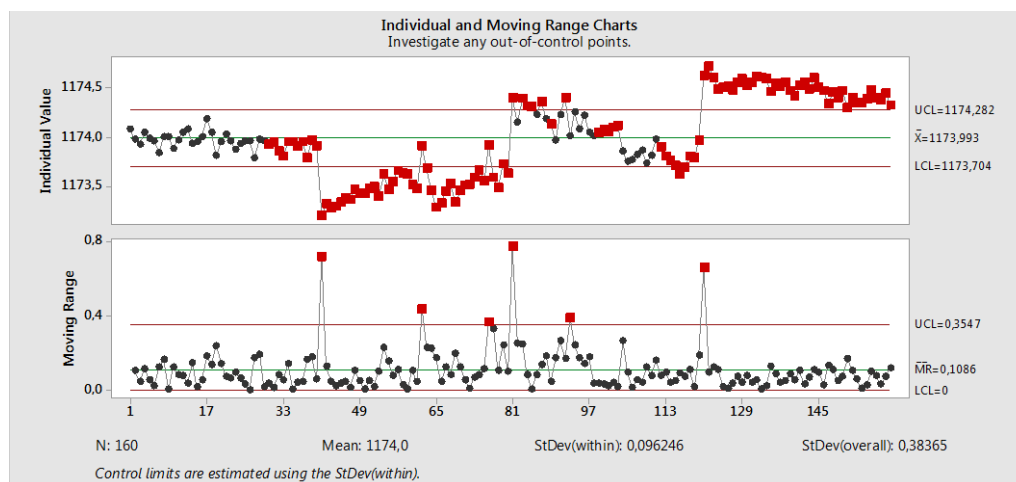
3.3 Tilastollisen prosessinohjauksen soveltaminen valmistusprosessin osaprosesseihin

Tilastollista prosessinohjausta sovellettiin valmistusprosessin osaprosesseihin kokonaisvaihtelun määrän, hajonnan ja vaihtelulähteiden selvittämiseksi. Prosessin tilastollista seuranta varten mitattiin neljän eri valmistuserän kappaleita siten, että joka viides solulta valmistunut kappale valittiin näytteeksi. Näytteiden määräksi muodostui 40 kappaletta valmistuserää kohden ja näytteiden kokonaismääräksi 160 näytettä. Valmistuserän aloituksessa prosessin annettiin stabiloitua ennen ensimmäistä näytteenottoa. Samaa käytäntöä sovellettiin myös tilanteissa, kun prosessissa havaittiin normaalista poikkeava tilanne eli mahdollinen erityisyys. Näytteet mitattiin aikaisemmin esitellyllä koordinaattimittausmenetelmällä ja samaa mittausasetelmaa hyödyntäen. Mittaukset suoritettiin yhden mittajan toimesta. Vaikka mittausmenetelmä todettiin kyseisiin mittauksiin pääosin soveltumattomaksi, ovat mittaus tulokset kuitenkin suuntaa-antavia ja mittausepävarmuuden määrittelyyn verrattuna vaihtelua vähentää yhden mittajan käyttö kolmen sijasta. Koska mittaukset tehtiin muiden mittauksien ohessa ja valmistussolun ulkopuolella, ei mittaus tapahtunut reaaliaikaisesti. Tämä seikka ei mahdollista täysipainoista SPC-menetelmän hyödyntämistä, koska prosessin muutoksiin ei päästä välittömästi käsiksi ja erityisyyden tunnistaminen ei ole yksiselitteistä. Silti menetelmä antaa näinkin kuvan prosessin näytteidenoton hetkisestä tilasta ja suuntaviivoja prosessin kehittämiseksi.

Taivutussolun eri valmistusvaiheiden tilastollisen seuraamisen mahdollistamiseksi valittiin mittaustulosta analysoitavaksi mitat 1, 4, 5 ja 6 eli samat mitat kuin Gage R&R -testissä. Mittaustulosten analysointiin ja prosessin seurantaan hyödynnettiin I-MR-valvontakorttia. Kyseinen kortti soveltuu hyvin kohteeseen, jossa mitataan yksittäisiä näytteitä näyte-erien sijasta. Kortin soveltamisessa hyödynnettiin Minitab 18 -ohjelmistoa, jonka avulla mitta-arvot pystyttiin käsittelemään ja analysoimaan tehokkaasti. Mittaustuloksia jatkoanalysoitiin myös erilaisilla tilastotieteen työkaluilla prosessiin vaikuttavien tekijöiden löytämiseksi. Lisäksi jokaisen analysoitavan mitan osalta tarkasteltiin erikseen operaattorien, materiaalierän ja valmistuslämpötilan vaikutusta saatuihin mittaustuloksiin. Tarkastelussa käytettiin hyväksi tilastollisista menetelmistä varianssianalyysiä, t-testiä ja regressioanalyysiä.

3.3.1 Kappaleen pituuden mittaustulokset

Mitta 1 kuvaa valmistussolun sahan kyvykkyyttä tuottaa vaatimusten mukaisia kappaleita. Kappaleiden mitoituksen kannalta olennaisia asioita ovat kappaleen kokonaispituus ja päiden sahauskulman oikeellisuus. Kappale sahataan kahdella pyörösahalla samanaikaisesti, samalla kiinnityksellä. Kuvan 3.7 mittaustuloksista voidaan nähdä selvästi valmistuserien vaihtelut ja jonkinasteista prosessin ajautumista valmistuserien sisällä. Mitattujen kappaleiden pituuden keskiarvo on 1173,99 mm, ja kappaleelle annettu nominaalimitta on $1172,00^{+0}_{-1}$ mm.

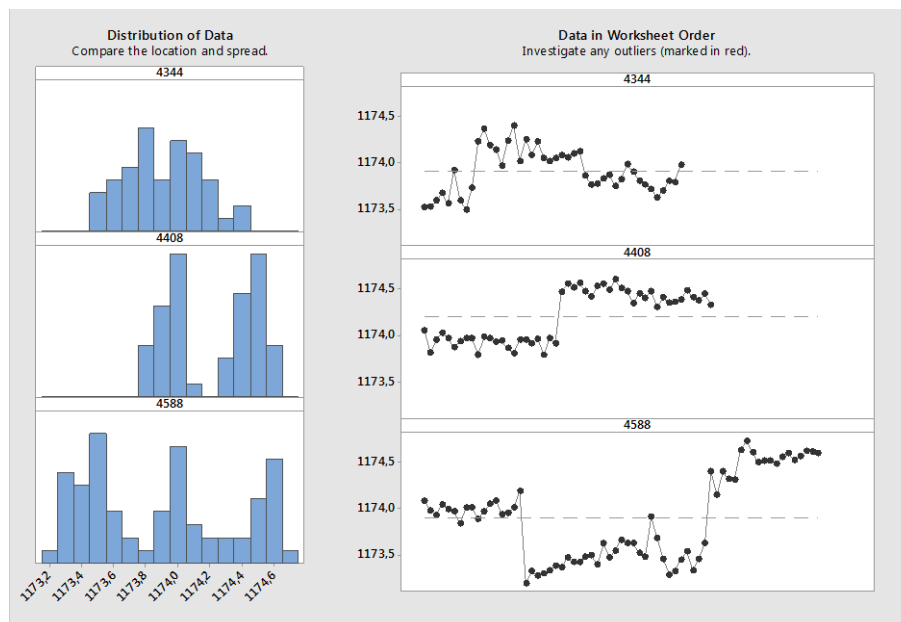


Kuva 3.7 I-MR-kaavio, mitta 1

Valmistuserä yksi on prosessin näkökulmasta hyvin hallinnassa. Erässä ei ole yhtään rajojen ylitystä, ja mittaustulokset ovat sarjan alkupuolella pääsääntöisesti keskiarvon molemmin puolin. Valmistuserän lopussa mittaustulokset painuvat kuitenkin keskiarvon alapuolelle siten, että 19 näytettä on keskiarvon alapuolella. Pitkäaikainen ajautuminen keskiarvon alapuolelle voidaan tulkita erityisyyksi, jonka todennäköisyys tässä tapauksessa on $0,5^{19} = 0,00019$ %. Valmistuserä kaksi on kokonaisuudessaan mittaustulosten keskiarvon alapuolella ja pääsääntöisesti myös alavalvontarajan alapuolella. MR-kaaviosta käy hyvin esille, kuinka sahauspituus on lähtökohtaisesti säädetty huomattavasti aiempaa

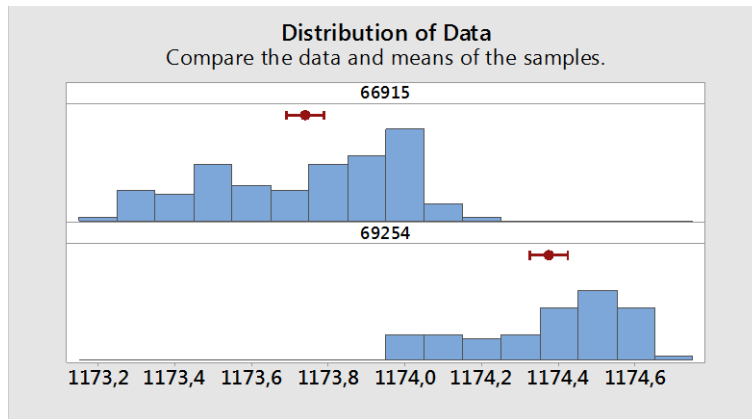
erää lyhyemmäksi. Kolmannen valmistuserän kappaleen katkaisupituus on säädetty huomattavasti pidemmäksi kuin aikaisemmissa erissä. Tämä on nähtävissä sekä I-kaavion ylävalvontarajan ylittävistä mittaustuloksista että MR-kaavion korkeasta piikistä näytteen 81 kohdalla. Neljännessä valmistuserässä kappaleet ovat huomattavasti pidempiä kuin yhdessäkään aiemmassa erässä. Prosessi pysyy koko valmistuserän ajan vakaana, ja näyttäisi siltä, että sitä ei edes yritetä ohjata lähelle muita valmistuseriä.

Käyttämällä työkaluna varianssianalyysiä voidaan kuvasta 3.8 huomata operaattorikohtaiset vaihtelut mittaustulosten muodostumisessa ja tulosten jakaumassa. Operaattori 1:n tulos on lähimpänä normaalijakaumaa. Siitä huolimatta, että jakauman keskellä on selvä pudotus mitatuissa arvoissa, on tulos normaalisuustestin mukaan normaalijakautunut. Operaattori 2:n tulos on selvästi kaksihuippuinen ja painottuu suurempiin mitta-arvoihin. Tulos ei ole testin mukaan normaalijakautunut. Operaattori 3:n tulos on yhdistelmä vinoa jakaumaa ja kolmihippuista jakaumaa. Operaattori 3:n tulos ei ole testin mukaan normaalijakautunut.



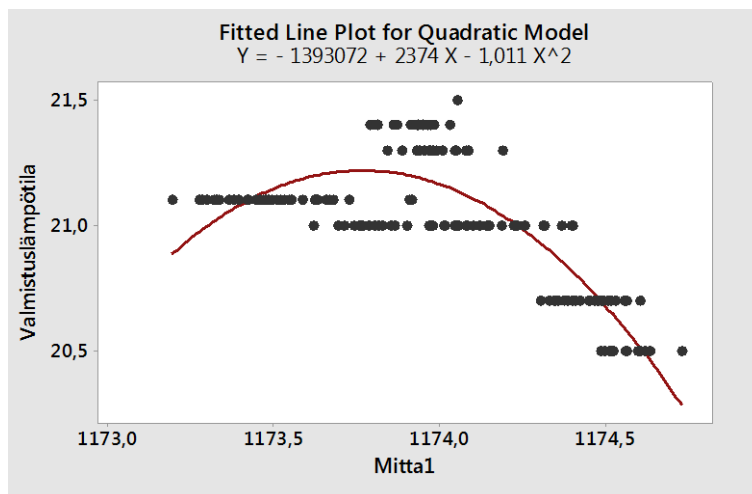
Kuva 3.8 Varianssianalyysi, operaattorit, mitta 1

T-testin avulla voidaan tilastollisesti selvittää eroja kahden ryhmän keskiarvojen välillä. T-testiä hyödynnetään tyypillisesti normaalijakautuneelle datalle. Testiä hyödynnettiin kuitenkin nyt selvityksessä materiaalierän vaihtelun vaikutuksesta mittaustuloksiin. Saatut tulokset ovat suuntaa-antavia. Materiaalierälle 66915 on mittauksissa tullut 96 näytettä ja erälle 69254 puolestaan 64 näytettä. Testi antaa 95 prosentin todennäköisyydellä materiaalierien mittaustulosten eroksi 0,57–0,70 mm, joten testin avulla voidaan huomata materiaalivaihtelun selvä vaikutus mittaustulokseen. Kuvan 3.9 mukaisesti materiaalierän 66915 mittaustulosten keskiarvo sijoittuu mittaan 1 173,74, kun erän 69254 keskiarvo on 1 174,37.



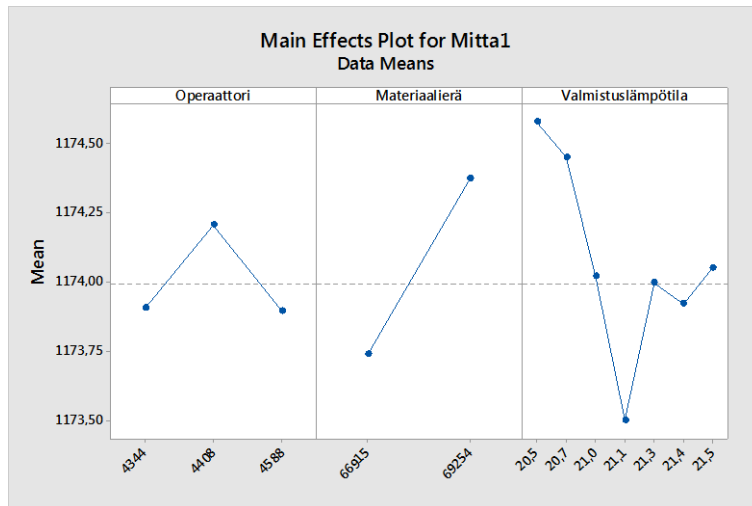
Kuva 3.9 *T-testi, materiaalierä, mitta 1*

Regressioanalyysi on työkalu, jonka avulla voidaan tutkia yhden tai useamman muuttujan vaikutusta selitettävään muuttujaan. Regressioanalyysiä hyödynnettiin tutkittaessa valmistuslämpötilan vaikutusta putken sahausprosessiin. Valmistuslämpötilan kokonaisvaihtelu valmistuserien aikana oli 1 °C, ja sahattujen kappaleiden mittaustulokset jakautuivat kuvan 3.10 mukaisesti lämpötila-alueelle. Valmistuslämpötilalla on analyysin mukaan vaikutusta valmistettujen kappaleiden pituuteen. Regressioanalyysin tulosten mukaan 60 prosenttia sahattujen kappaleiden pituusvaihtelusta voidaan selittää valmistuslämpötilan muutoksella.



Kuva 3.10 *Regressioanalyysi, tulosten jakautuminen lämpötilan mukaan, mitta 1*

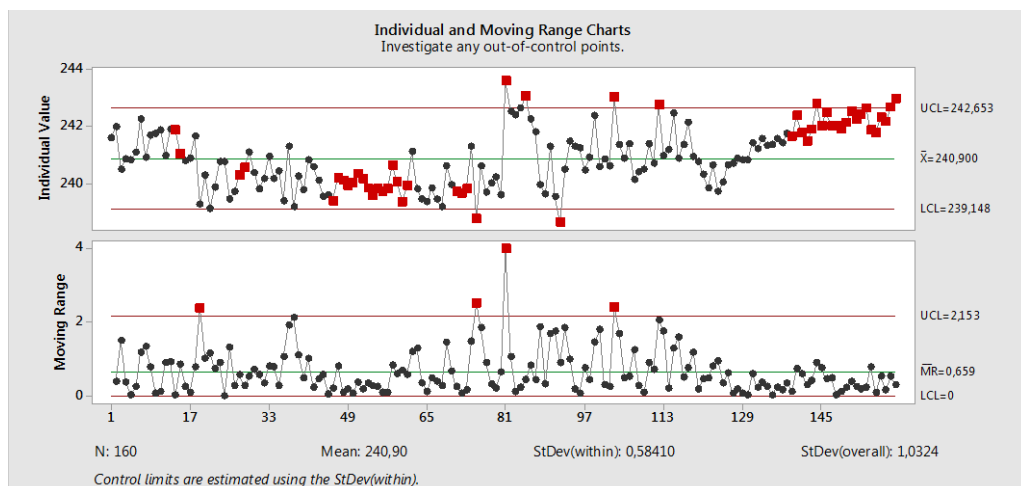
Muuttujakohtainen kokonaisvaikutus mitan 1 vaihteluun on esitetty kuvassa 3.11. Tulosten mukaan suurin vaikutus on lämpötilanvaihtelulla ja lähes yhtä paljon materiaalierällä. Operaattorin vaikutus on muuttujista vähäisin. Lämpötilan vaikutuksen tulokset eivät ole täysin johdonmukaisia, koska lämpötilan vaikutus ei ole selvästi lineaarinen, mutta tulokset ovat kuitenkin linjassa aikaisemmin saatujen tulosten kanssa.



Kuva 3.11 Muuttuja-analyysi, muuttujakohtainen vaikutus tuloksiin, mitta 1

3.3.2 Kappaleen taivutuksen mittaustulokset

Mitta 4 kuvaa taivutuskoneen kykyä tuottaa vaatimusten mukaisia taivutettuja kappaleita. Kokonaisuudessaan taivutusprosessissa näkyy kuvan 3.12 mukaisesti selvää heiluntaa sekä taivutuserän sisällä että erien välillä. Lisäksi taivutusprosessi myös joissain tapauksissa ajautuu äärilaidasta toiseen. Jakauman keskiarvo on huomattavasti sivussa määritellyn nominaalimitaan nähden. Mitan 4 nominaali on $247,00 \pm 2$ mm, ja mittausten jakauman keskiarvo on 240,90 mm.

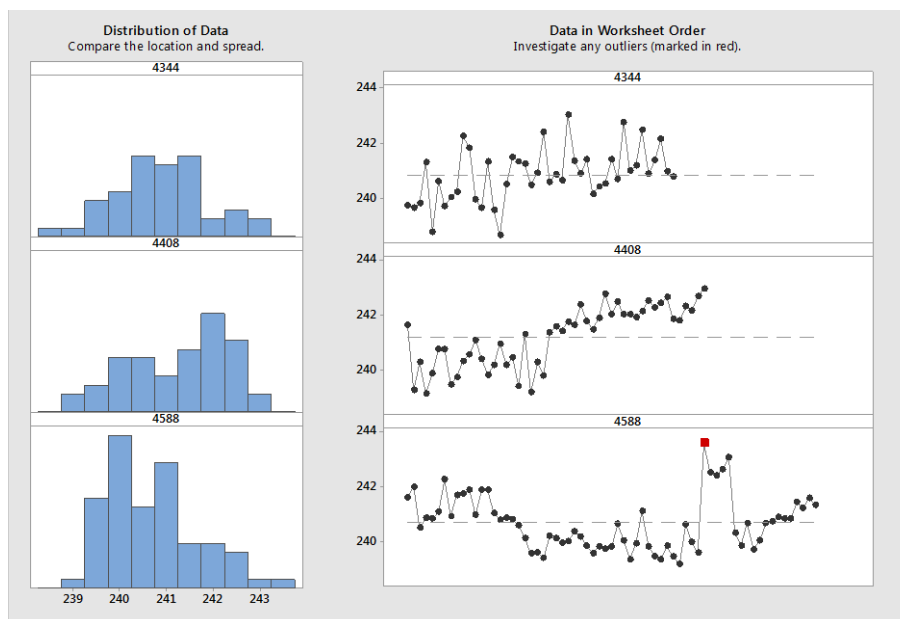


Kuva 3.12 I-MR kaavio, mitta 4

I- ja MR-kaavioiden perusteella voidaan huomata selvä taivutusmitan muutos ensimmäisen valmistuserän puolessavälissä, lukuarvoltaan noin 2 mm. Muutos näkyy MR-kaaviossa valvontarajojen ylityksenä. Prosessi on selvästi siirtynyt muutoksen jälkeen. Valmistuserä kaksi on tuloksiltaan melko tasainen, ja erityisen suurta heiluntaa tai merkittäviä tason muutoksia ei ole havaittavissa. Kolmas valmistuserä alkaa uudella materiaalierällä ja eri operaattorin toimesta. Prosessissa on havaittavissa huomattava tason muutos erän aloituksessa ja merkittävää heiluntaa koko valmistuserän läpi. Neljäs valmistuserä alkaa

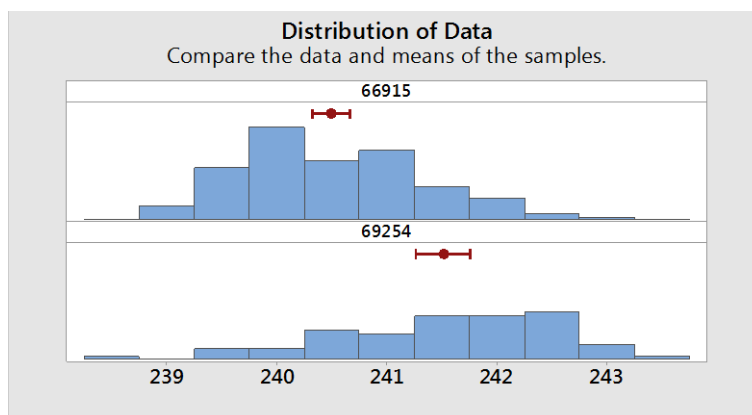
jälleen laajemmalla prosessin vaihtelulla, mutta vaihtelu rauhoittuu nopeasti. Ennen erän päättymistä prosessi on ollut yhtäjaksoisesti keskiarvon yläpuolella 30 mittausarvoa. Tämän tilastollinen todennäköisyys on 9^{-8} %, joten se voidaan tulkita erityisyyksi. Valmistuserän aikana prosessin ajautuminen on hyvin systemaattista.

Varianssianalyysillä voidaan huomata operaattorikohtaiset vaihtelut mittaustulosten ja jakaumien muodostumisessa kuvan 3.13 mukaisesti. Operaattori 1:n tulos on normaalisuustestin mukaan normaalijakautunut. Operaattori 2:n tulos on kaksihuippuinen ja vinon jakauman yhdistelmä, joka ei ole testin mukaan normaalijakautunut. Operaattori 3:n tulos on vino jakauma, joka ei ole testin mukaan normaalijakautunut.



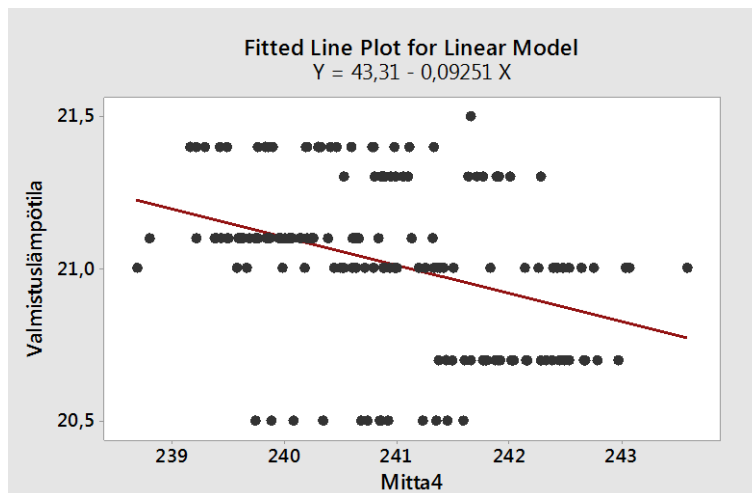
Kuva 3.13 Varianssianalyysi, operaattorit, mitta 4

Kuvassa 3.14 esitetyn T-testin mukaan materiaalierän vaihtelulla on selvä vaikutus taivutuksen mittaustuloksiin. Materiaalierälle 66915 on mittauksissa tullut 96 näytettä ja erälle 69254 puolestaan 64 näytettä. Testi antaa 95 prosentin todennäköisyydellä materiaalien mittaustulosten eroaksi 0,74–1,32 mm. Materiaalierän 66915 mittaustulosten keskiarvo sijoittuu mittaan 240,49 mm, kun erän 69254 keskiarvo on 241,51 mm.



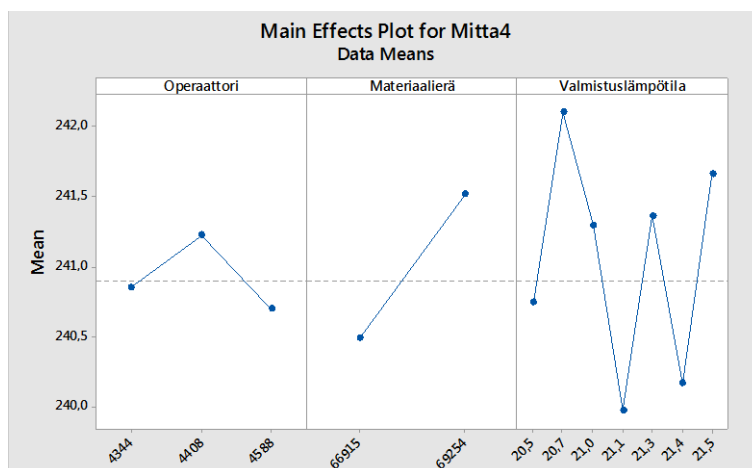
Kuva 3.14 T-testi, materiaalierä, mitta 4

Valmistuslämpötilan kokonaisvaihtelu valmistuserien aikana oli 1 °C, ja taivutettujen kappaleiden mittaustulokset jakautuivat tasaisesti lähes koko lämpötila-alueelle kuvan 3.15 mukaisesti. Vaikka lämpötilan ja taivutuksen välillä on havaittu korrelaatio, ei valmistuslämpötilan muutoksella regressioanalyysin mukaan havaittu olevan merkittävää vaikutusta valmistettujen kappaleiden taivutusmittojen toteutumiseen. Regressioanalyysin mukaan vain 12,66 prosenttia taivutusmittojen vaihtelusta voidaan selittää valmistuslämpötilan muutoksella.



Kuva 3.15 Regressioanalyysi, tulosten jakautuminen lämpötilan mukaan, mitta 4

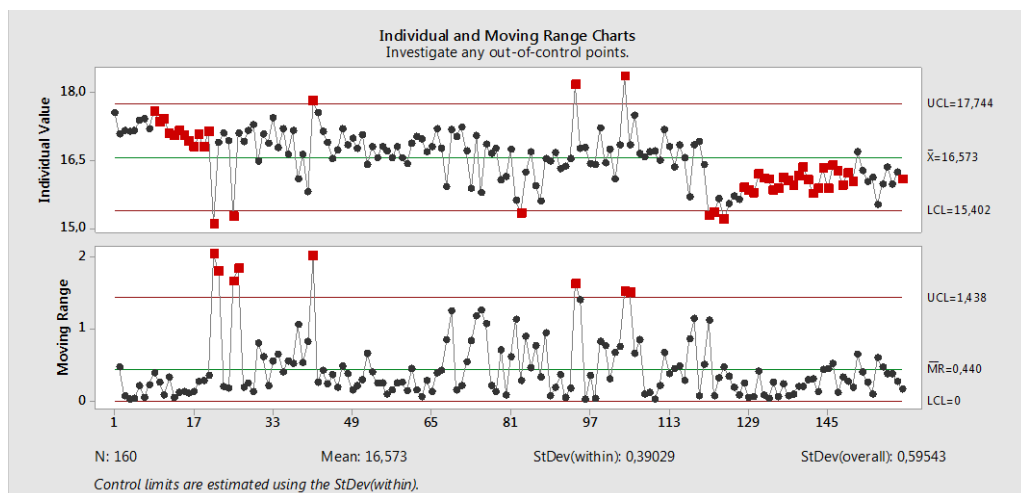
Kuvassa 3.16 esitetyn muuttuja-analyysin mukaan muuttujakohtaisesti suurin kokonaisvaikutus mittaan 4 on materiaalierällä ja seuraavaksi suurin operaattorilla. Lämpötilan vaihtelun vaikutus ei ole looginen, koska tulos ei ole miltään osin lineaarinen. Lämpötilan muutos voidaankin tulkita olevan johdannainen muiden vaihtelulähteiden vaihtelusta. Tulokset ovat linjassa aikaisemmin saatujen tulosten kanssa.



Kuva 3.16 Muuttuja-analyysi, muuttujakohtainen vaikutus tuloksiin, mitta 4

3.3.3 Kappaleen koneistuksen Z-akselin mittaustulokset

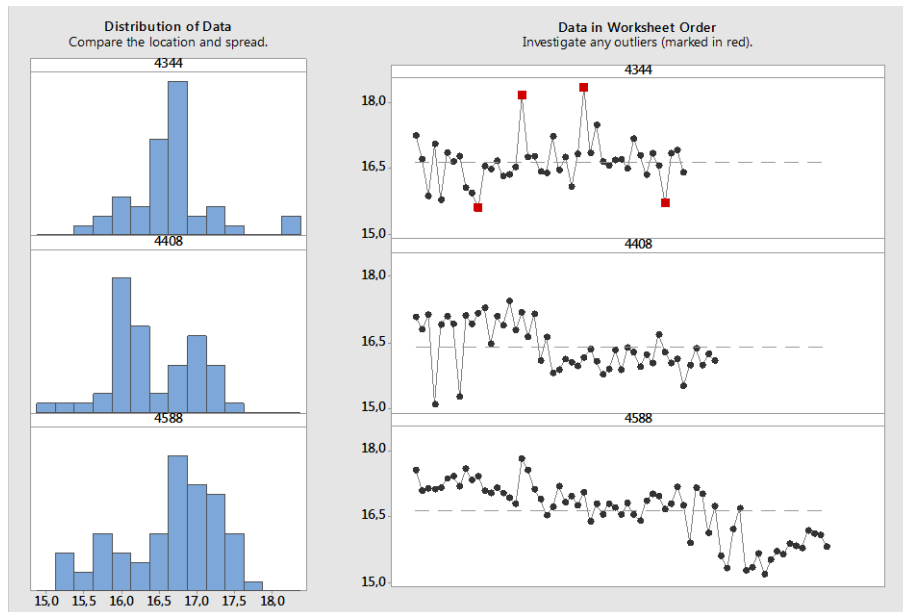
Mitta 5 kuvaa reikien koneistukseen käytettävän robotin kykyä tuottaa vaatimusten mukaisia koneistettuja piirteitä Z-akselin suuntaisesti. Kuvassa 3.17 esitettyjä mittaustuloksia tarkasteltaessa on havaittavissa viitteitä valmistuserien vaihtelusta, mutta ainakin osittain tulokset peittyvät prosessin laajan vaihtelun alle. Prosessissa näkyikin laajaa heiluntaa valmistuserien sisällä. Prosessissa on myös nähtävissä tulosten ajautumista. Jakauman keskiarvo on huomattavasti sivussa määritellyyn nominaalimittaan nähden. Mitan 5 nominaali on $20,90^{+1}_{-1}$ mm, ja mittausten jakauman keskiarvo on 16,57 mm.



Kuva 3.17 I-MR-kaavio, mitta 5

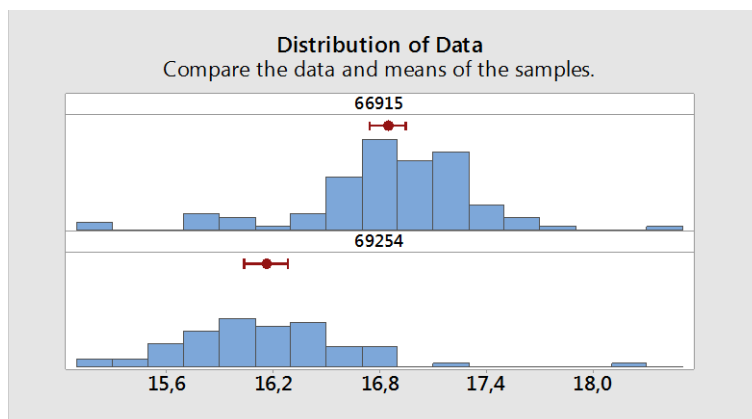
Ensimmäisessä valmistuserässä prosessin vaihtelu on vähäistä ja hyvin hallinnassa lukuun ottamatta erän keskellä olevia voimakkaita poikkeamia mittaustuloksissa. Kyseisten tulosten voidaan olettaa johtuvan mittausvirheestä. Toisen valmistuserän alku näkyy selvänä piikkinä sekä MR- että I-kaavioissa. Prosessi vaihtelee ajoittain voimakkaammin, kuitenkin valvontarajojen sisällä. Kolmas valmistuserä alkaa I-kaavion keskiarvon tuntumasta mutta ajautuu nopeasti I-kaaviossa piikkimäisesti alavalvontarajan alapuolelle. Erässä on havaittavissa useita yksittäisiä piikkimäisiä mittaustuloksia. Piikkimäiset muutokset ovat selviä erityissyytä prosessissa. Neljäs valmistuserä alkaa I-kaaviossa huomattavasti alemmalta tasolta kuin aikaisemmat erät, alavalvontarajan alapuolelta. Prosessi alkaa vähitellen siirtyä keskiarvoa kohti, mutta vaihtelu pysyy erittäin hyvin hallinnassa.

Kuvassa 3.18 esitetyn varianssianalyysin avulla voidaan todeta operaattorikohtaiset vaihtelut mittaustulosten muodostumisessa. Myös koneistuksen osalta operaattorikohtaiset jakaumat ovat erilaisia, ja normaalisuustestin mukaan normaalijakautunutta tulosta ei tuloksissa esiinny. Operaattori 1:n tulos muistuttaa normaalijakaumaa, mutta selvät poikkeamat muusta jakaumasta kertovat laajasta vaihtelusta. Operaattori 2:n tulos on myös koneistuksen osalta kaksihuippuinen, ja yksittäisiä poikkeavia tuloksia on mittaussarjassa useita. Operaattori 3:n jakauma muistuttaa osittain normaalijakaumaa, mutta mittaustulosten vaihtelu alarajalla tuo jakaumaan vinoutta.



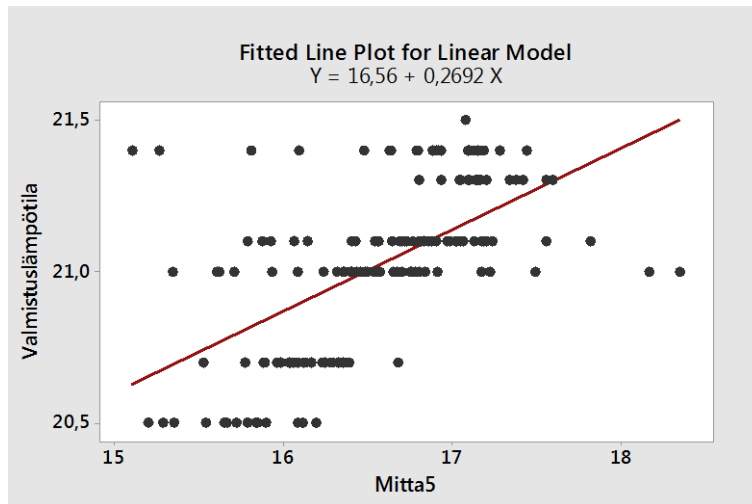
Kuva 3.18 *Varianssianalyysi, operaattorit, mitta 5*

T-testin avulla analysoitiin materiaalierän vaihtelun vaikutuksia koneistuksen Z-suunnan mittaustuloksiin. Tulokset on esitetty kuvassa 3.19. Materiaalierälle 66915 on mittauksissa tullut 96 näytettä, ja erälle 69254 on tullut 64 näytettä. Testi antaa 95 prosentin todennäköisyydellä materiaalien mittaustulosten eroaksi 0,53–0,84 mm, joten testin avulla voidaan huomata jonkin verran vaikutusta materiaalivehtelun ja koneistuksen mittaustuloksen välillä. Materiaalierän 66915 mittaustulosten keskiarvo sijoittuu mittaan 16,85 mm, kun erän 69254 keskiarvo on 16,16 mm.



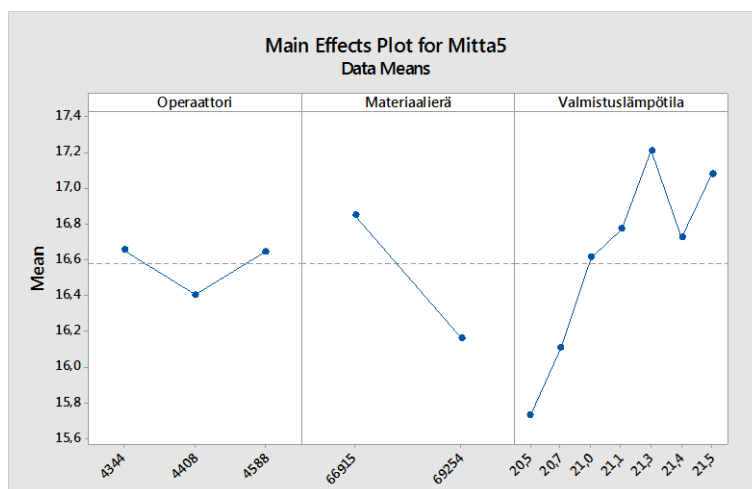
Kuva 3.19 *T-testi, materiaalierä, mitta 5*

Regressioanalyysiä hyödynnettiin tutkittaessa valmistuslämpötilan vaikutusta koneistuksessa. Valmistuslämpötilan kokonaisvaihtelu valmistuserien aikana oli 1 °C, ja koneistettujen kappaleiden mittaustulokset jakautuivat jokseenkin lineaarisesti lämpötilan mukaan kuvan 3.20 mukaisesti. Selvä korrelaatio koneistuksen ja valmistuslämpötilan välillä on havaittavissa. Regressioanalyysin mukaan 35,64 prosenttia koneistusmittojen vaihtelusta voidaan selittää valmistuslämpötilan muutoksella.



Kuva 3.20 Regressioanalyysi, tulosten jakautuminen lämpötilan mukaan, mitta 5

Kuvan 3.21 mukaan muuttujakohtaisesti suurin kokonaisvaikutus mittaan 5 on lämpötilalla ja seuraavaksi suurin materiaali-erällä. Operaattorin vaikutus tuloksiin on selvästi pienin.

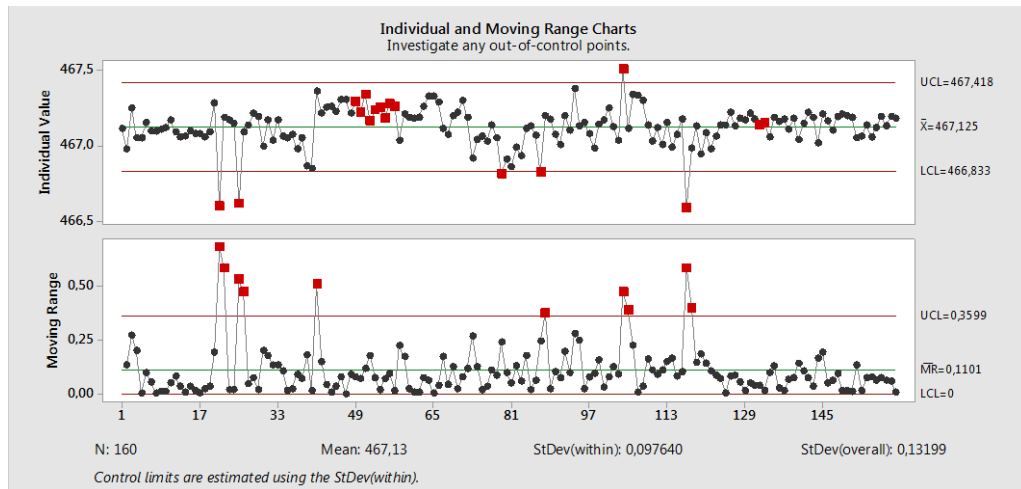


Kuva 3.21 Muuttuja-analyysi, muuttujakohtainen vaikutus tuloksiin, mitta 5

3.3.4 Kappaleen koneistuksen Y-akselin mittaustulokset

Mitta 6 kuvaa kappaleen reikien koneistukseen käytettävän robotin kykyä tuottaa vaatimusten mukaisia koneistettuja piirteitä Y-akselin mukaisesti. Kuvan 3.22 I-kuvaajan tuloksista on havaittavissa joissain määrin valmistuserien vaihtelua, mutta yhtä selkeää eräkohtaista jakoa ei ole havaittavissa kuin esimerkiksi mitan 1 kohdalla. Prosessi on kokonaisuudessaan melko tasalaatuinen, joskin yksittäisiä I-kuvaajan valvontarajojen ylityksiä on havaittavissa. MR-kaaviossa on myös havaittavissa yksittäisiä piikkimäisiä poikkeamia muuten tasalaatuisesta sarjasta. Jakauman keskiarvo on sivussa määritellyyn nominaalimitaan nähden. Mitan 6 nominaali on $466,50^{+0,1}_{-0,1}$ mm, ja mittausten jakauman

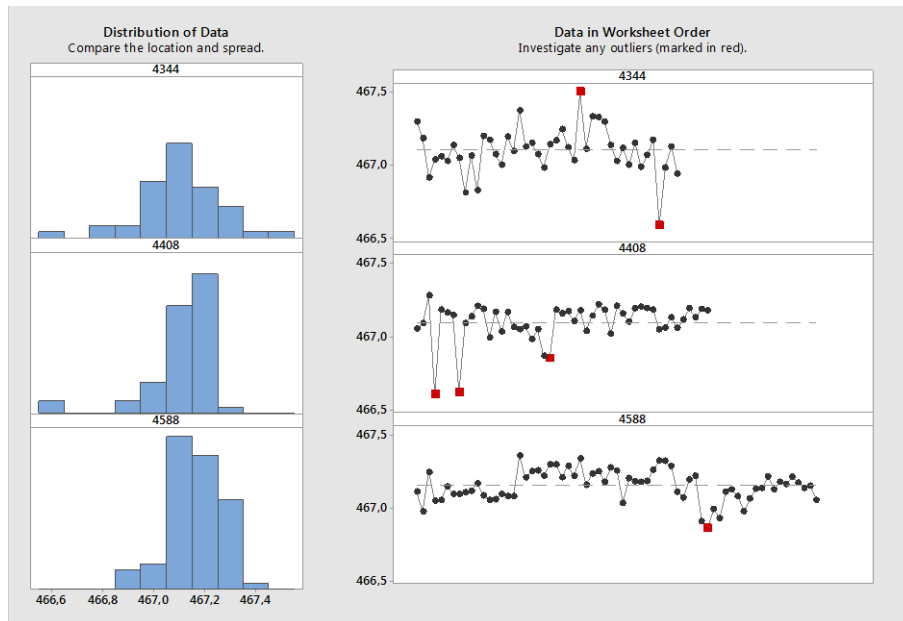
keskiarvo on 467,13 mm. Mitan jakaumaan vaikuttaa luonnollisesti koneistusrobotin toistotarkkuus, joka on 0,07 mm. Pääsääntöisesti mitta 6 kertoo suurnopeuskaralla varustetun robotin toistotarkkuuden arvon mittausvirhe mukaan luettuna.



Kuva 3.22 I-MR kaavio, mitta 6

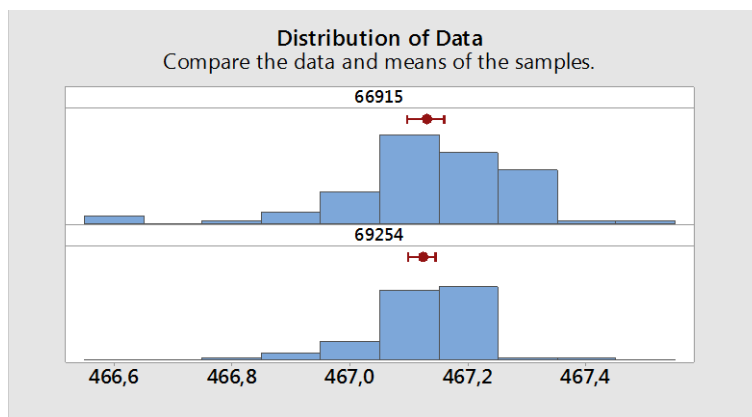
Ensimmäinen valmistuserä alkaa I-kaavion keskiarvon tuntumasta. Prosessin vaihtelu on vähäistä ja hyvin hallinnassa. Kappaleiden 21 ja 25 aikana tulee voimakkaita poikkeamia mittaustuloksissa, kuten myös mitan 5 osalta oli havaittavissa. Toinen valmistuserä alkaa läheltä I-kaavion ylävalvontarajaa ja huomattavasti ylempää kuin ensimmäinen valmistuserä. Prosessi pysyy hyvin hallinnassa ja säilyttää tasonsa keskiarvon ja ylävalvontarajan välissä. Kappaleen 71 kohdalla vaihtuu operaattori, jolloin tulosten taso laskee I-kaaviossa huomattavasti. Kuitenkin prosessi alkaa ajautua myös voimakkaasti alapäin alavalvontarajan suuntaan. Prosessi asettuu I-kaavion alavalvontarajan tuntumaan valmistuserän päättyessä, käyden ensin alavalvontarajan alapuolella. Kolmas valmistuserä alkaa I-kaavion alarajan tuntumasta, mutta ajautuu nopeasti I-kaaviossa keskiarvon tuntumaan alapuolelle. Piikkimäiset muutokset ovat selviä erityisyyttä prosessissa. Prosessi jatkaa heilumista keskiarvon läheisyydessä, mutta kappaleen 117 kohdalla esiintyy yksittäinen poikkeava mittaustulos, jossa prosessi painuu alavalvontarajan alapuolelle. Muutoksen jälkeen prosessi palaa keskiarvon tuntumaan. Neljäs valmistuserä alkaa I-kaaviossa keskiarvon ja alavalvontarajan puolestavälistä. Prosessi siirtyy kuitenkin nopeasti keskiarvon tuntumaan. Prosessin vaihtelu pysyy erittäin hyvin hallinnassa koko valmistuserän ajan.

Kuvassa 3.23 esitetyn varianssianalyysin avulla voidaan todeta, että Y-akselin koneistuksen osalta operaattorikohtaiset jakaumat ovat tähänastisista normaalijakaumista lähimpänä tavoitteellista normaalijakaumaa. Operaattori 1:n tulos on normaalisuustestin mukaan normaalijakautunut. Yksittäinen poikkeama muusta jakaumasta kertoo kuitenkin vaihtelusta. Operaattori 2:n tulos on koneistuksen osalta vino, ja yksittäinen poikkeama sarjasta on havaittavissa. Operaattori 2:n tulos ei normaalijakautunut. Operaattori 3:n jakauma on testin mukaan normaalijakautunut, vaikka jakauma onkin muodoltaan hieman vinoutunut.



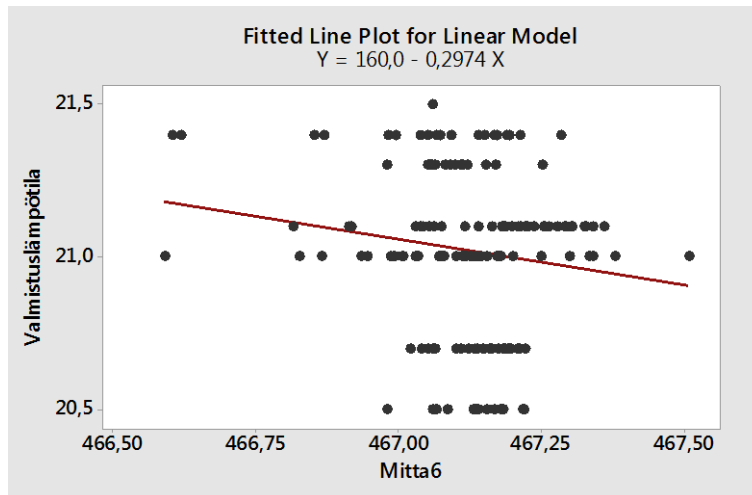
Kuva 3.23 *Varianssianalyysi, operaattorit, mitta 6*

Kuvan 3.24 mukaan materiaalierän vaihtelun vaikutus koneistuksen Y-suunnan mittaustuloksiin on pieni. Materiaalierälle 66915 on mittauksissa tullut 96 näytettä ja erälle 69254 vastaavasti 64 näytettä. Testi antaa 95 prosentin todennäköisyydellä materiaalierien mittaustulosten eroaksi $-0,03$ – $0,04$ mm, joten testin avulla ei juurikaan voida havaita vaikutusta materiaalivaihtelun ja koneistuksen mittaustuloksen välillä. Materiaalierän 66915 mittaustulosten keskiarvo sijoittuu mittaan $467,13$, kun erän 69254 keskiarvo on $467,12$.



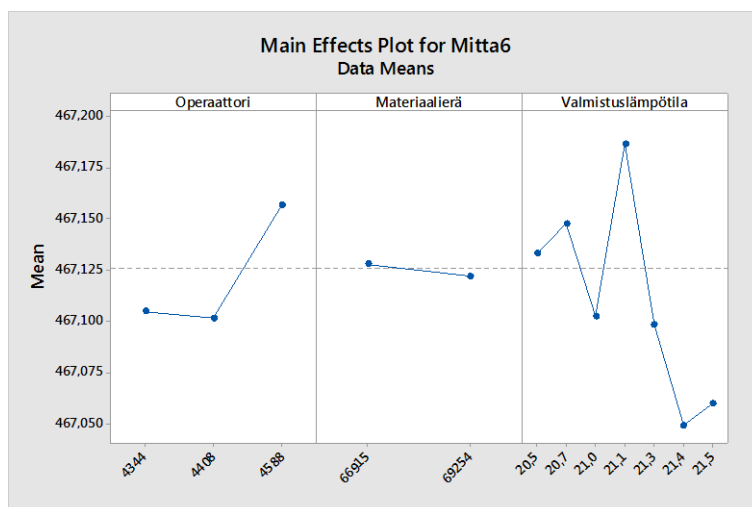
Kuva 3.24 *T-testi, materiaalierä, mitta 6*

Kuvan 3.25 mukaisesti valmistuslämpötilan kokonaisvaihtelu valmistuserien aikana oli 1 °C, ja koneistettujen kappaleiden mittaustulokset jakautuivat melko tasaisesti lämpötilamuuttujan asteikolle. Lämpötilan ja koneistuksen välillä havaittiin kuitenkin vähäinen korrelaatio. Regressioanalyysin mukaan $2,14$ prosenttia koneistusmittojen vaihtelusta voidaan selittää valmistuslämpötilan muutoksella.



Kuva 3.25 Regressioanalyysi, tulosten jakautuminen lämpötilan mukaan, mitta 6

Muuttujakohtaisesti suurin kokonaisvaikutus mittaan 6 on lämpötilalla ja seuraavaksi suurin operaattorilla kuvan 3.26 mukaisesti. Lämpötilan vaikutus ei ole kuitenkaan lineaarinen ja johdonmukainen, joten vaihtelun voidaan olettaa ainakin osittain olevan seurausta muista muuttujista. Operaattorin välinen jakauma tuloksissa on nyt selvästi erilainen kuin aikaisemmissa mitoissa.



Kuva 3.26 Muuttuja-analyysi, muuttujakohtainen vaikutus tuloksiin, mitta 6

3.4 Valmistusprosessin osaprosessien suorituskyky

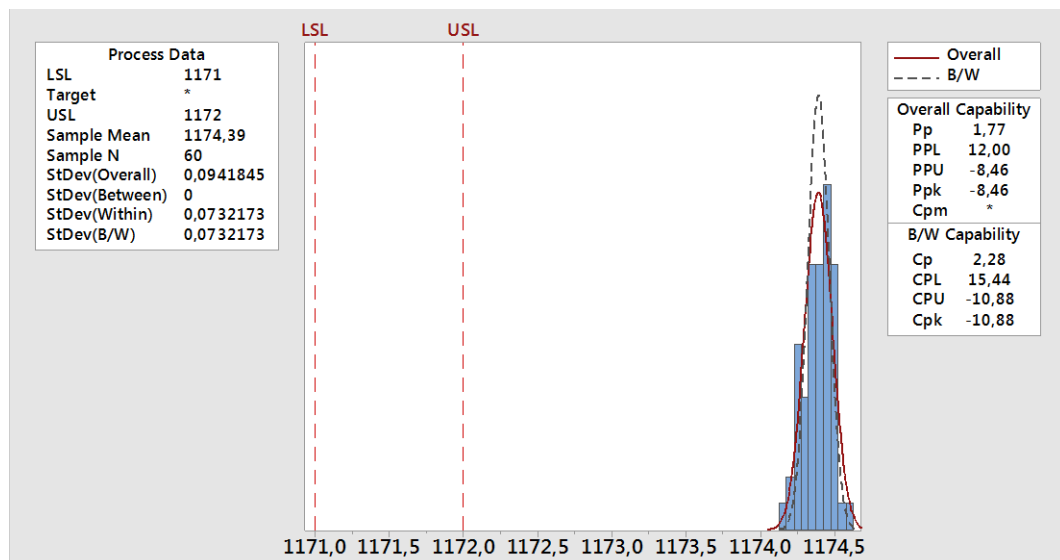
Ohjeiden mukaan prosessin maksimisuorituskyky ja suorituskykyluku voidaan laskea vain prosesseille, jotka ovat hallinnassa ja joiden tulokset muodostavat normaalijakauman. Aiempien tuloksien mukaan mikään valmistusprosessin osa ei täytä näitä molempia ehtoa. Koska prosessin suorituskykyyn liittyvät mittaukset tehtiin samanaikaisesti muiden mittausten kanssa, suuntaa-antavat tulokset käsitellään lyhyesti samassa yhteydessä. Analysointi on jaettu tunnuslukujen osalta kahteen kategoriaan: kokonais suorituskykylukuihin (overall capability) ja lyhytvaikutteisiin, eräkohtaisiin ja erien välisiin tun-

nuslukuihin (between/within). Maksimisuorituskykyluku Pp/Cp kertoo normaalijakauman laadusta, mutta kyseinen tunnusluku ei ota huomioon jakauman sijaintia toleransseihin nähden. PPL/CPL mittaa jakauman alareunan ja alatoleranssirajan suhteen jakauman keskiarvoon nähden. PPU/CPU mittaa jakauman yläreunan ja ylätoleranssirajan suhteen jakauman keskiarvoon nähden. Suorituskykyluku Ppk/Cpk kertoo jakaumalle lähemmän toleranssirajan ja alareunan suhteen jakauman keskiarvoon nähden. Kaikille tunnusluvuille raja-arvona pidetään lukua 1,33, jota suurempi tuloksen tulisi olla, jotta suorituskyky on riittävä.

Prosessin suorituskykymittauksia varten ajettiin solussa 60 kappaleen erä näytteitä, jonka aikana prosessin säätötoimenpiteitä ei tehty. Jokainen erän kappale valittiin näytteeksi. Näytteet mitattiin samalla koordinaattimittausmenetelmällä ja mittaasetelmalla kuin aikaisemmin. Mittaukset suoritettiin yhden mittaajan toimesta. Myös tässä analyysissä tulee huomioda suuri mittausepävarmuus mittaustuloksissa. Prosessin suorituskykyä analysoitiin samojen mittojen avulla kuin aikaisemminkin. Mitta 1 kertoo sahan suorituskyvystä, mitta 4 taivutuskoneen suorituskyvystä sekä mitat 5 ja 6 koneistuksen suorituskyvystä.

3.4.1 Sahauksen suorituskyky, mitta 1

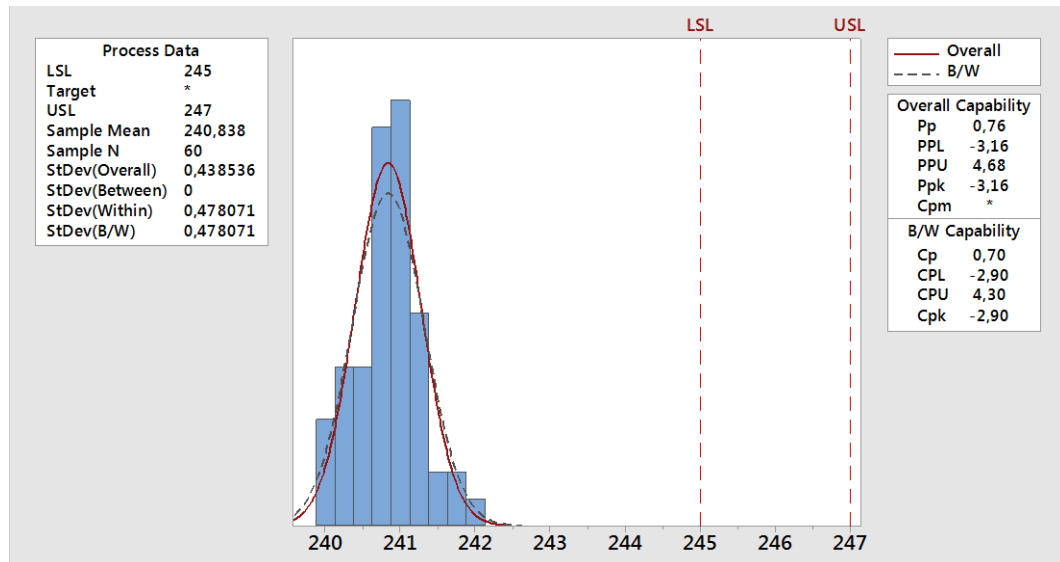
Kuvan 3.27 tuloksista nähdään, että sahausprosessin jakauma on tasainen ja noudattelee hyvin normaalijakaumaa. Jakauma on huomattavasti toleransseja suppeampi ja siinä mielessä suorituskykyinen mutta selvästi sivussa toleranssirajoista, mikä käy ilmi tunnusluvuistakin.



Kuva 3.27 Sahausprosessin suorituskyky, mitta 1

3.4.2 Taivutuksen suorituskyky, mitta 4

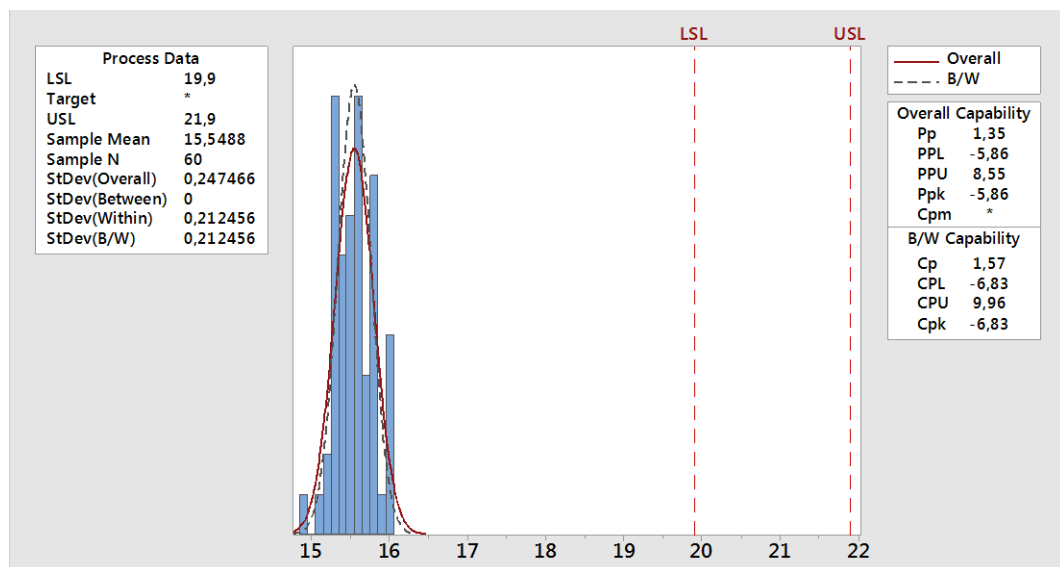
Kuvan 3.28 mukaan taivutuksen jakauma on hieman laajempi kuin toleranssirajat mahdollistavat. Jakauma on myös hieman vinoutunut. Tunnuslukujen mukaan prosessi ei ole riittävän suorituskykyinen ja jakauma on paljon sivussa toleranssialueelta.



Kuva 3.28 Taivutusprosessin suorituskyky, mitta 4

3.4.3 Koneistuksen suorituskyky, Z-akseli, mitta 5

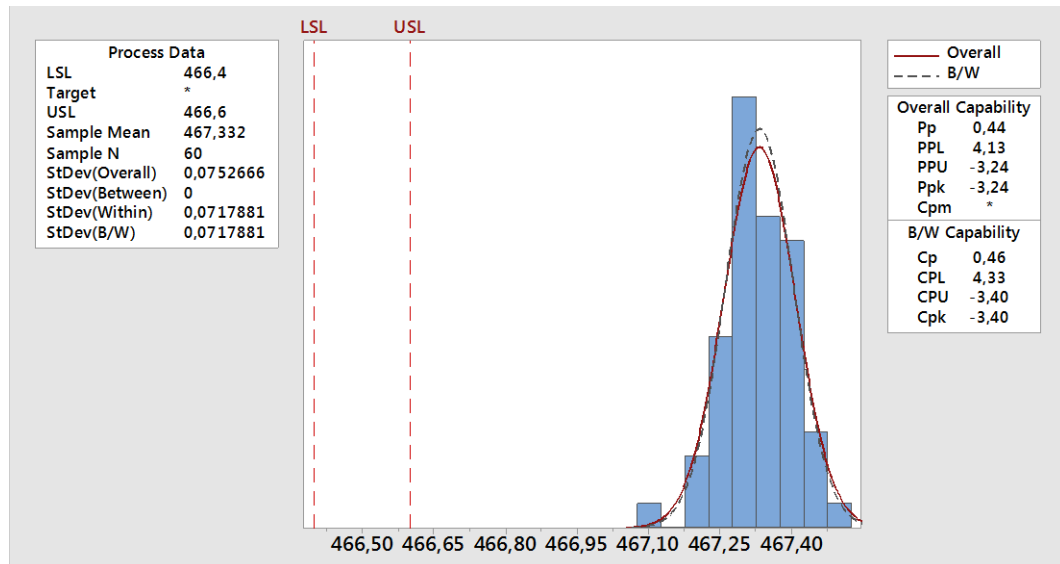
Kuvan 3.29 perusteella koneistuksen Z-akselin suorituskyky on hyvällä tasolla, mutta jälleen jakauma on pahasti sivussa toleranssialueelta. Jakaumassa on pientä vinoutumaa, mutta kokonaisuutena suorituskyky olisi toleransseihin nähden riittävä.



Kuva 3.29 Koneistusprosessin suorituskyky, Z-akseli, mitta 5

3.4.4 Koneistuksen suorituskyky, Y-akseli, mitta 6

Koneistuksen Y-akselin jakauma ei ole kuvan 3.30 mukaan riittävän suorituskykyinen toleransseihin nähden, vaikka jakauma onkin hyvin tasalaatuinen. Lisäksi jakauma on huomattavan sivussa toleranssialueelta.



Kuva 3.30 Koneistusprosessin suorituskyky, Y-akseli, mitta 6

3.5 Prosessinaikaisten mittausjärjestelmien kartoitus

3.5.1 Kartoitettavien järjestelmien valinta

Ennen mittausjärjestelmien kartoituksen aloittamista tehtiin päätös järjestelmältä vaadittavista ominaisuuksista, jonka avulla järjestelmämarkkinoilla toimivien toimijoiden määrää voitaisiin rajata soveltuvien osin. Mittausjärjestelmien kartoituksessa kriteereiksi asetettiin laitteiston täysivaltainen automatisoitavuus, järjestelmän riittävä erottelukyky valmistustoleranssien mukaisten kappaleiden mittaukseen, järjestelmän soveltuminen tehdasympäristöön, järjestelmän soveltuminen nykyiseen valmistussoluun, järjestelmän soveltuminen nykyisten valmistettavien kappaleiden mittaukseen vaaditussa tahtiajassa sekä järjestelmäedustajan toiminta kotimaan markkinoilla.

Koska osa vaatimuksista rajaa pois markkinoilla olevat koskettavat mittalaitteet, jäljelle jäivät optiset mittalaitteivaihtoehdot. Selvitystyön jälkeen keskustelu mittalaitteista avattiin viiden tunnetun toimijan kanssa, joista neljällä oli mahdollisuus lähteä tarjoamaan laitteistojaan kyseiseen sovelluskohteeseen. Kaikki toimijat kävivät tutustumassa valmistussoluun ja keskustelemassa ratkaisuvaihtoehdoista. Keskustelujen jälkeen kaikille toimijoille lähetettiin yhtenäinen dokumenttipaketti, joka sisälsi vaatimus- ja kysymyslistan, nykyisten tuotteiden valmistuspiirustukset ja 3D-mallit sekä valmistussolulayoutin. An-

nettujen tietojen pohjalta kaikilla toimijoilla oli kuukausi aikaa laatia budjettitarjous tarjoamastaan ratkaisusta. Yksi toimija ei ollut tarkemman analyysin jälkeen halukas tarjoamaan kokonaisratkaisua, joten lopullinen tarjousten määrä jäi kolmeen.

3.5.2 Kartoitettujen mittausjärjestelmien toimintaperiaatteet

Mittausjärjestelmien 1 ja 3 toiminta perustuu kappaleiden laserkolmiomittaukseen. Järjestelmän mittausyksikkö kiinnitetään mittausrobottiin, jonka avulla mitattavien kappaleiden pinnat skannataan noin 100 mm:n etäisyydeltä kappaleesta. Mitattava kappale siirretään solun käsittelyrobotilla erilliseen kiinnittimeen, joka on kiinteästi paikoillaan. Mittausrobottiin kiinnitetyn mittausyksikön sijaintia seurataan optisesti erillisellä valvontayksiköllä kolmiomittauksen keinoin. Valvontayksikkö on solussa kiinteästi paikoillaan. Valvontayksikkö siis paikoittaa mittausyksikön sijainnin mittauskoordinaatistoon, ja mittausyksikkö skannaa kappaleen pinnan geometrian. Mitattavaa geometriaa verrataan automaattisesti kappaleen 3D-malliin ja annettuihin toleransseihin, minkä jälkeen järjestelmä antaa operaattorille ja/tai roboteille signaalin kappaleen hyväksymisestä tai hylkäämisestä. Mittadata voidaan siirtää automaattisesti jatkokäsiteltäväksi erilliselle serverille.

Mittausjärjestelmän 2 toiminta perustuu strukturoidun valon menetelmään. Kappaleen pinnalle heijastetaan määritelty kuvio, jonka avulla kappaleen geometria mitataan usean kameran avulla. Järjestelmässä ei ole liikkuvia elementtejä, vaan kamerat ovat kiinteästi paikoillaan ja kappaletta voidaan solun käsittelyrobotin avulla tarvittaessa kääntää kuvien ottamisen välillä, mikäli kääntämiselle on tarvetta. Otettuja kuvia verrataan kappaleen 3D-malliin ja annettuihin toleransseihin. Järjestelmä antaa solun käsittelyrobotille ja/tai operaattorille signaalin kappaleen hyväksymisestä tai hylkäämisestä. Saatu mittadata voidaan siirtää automaattisesti jatkokäsiteltäväksi erilliselle serverille.

3.5.3 Kartoitettujen mittausjärjestelmien arviointiperusteet

Mittausjärjestelmien arviointiin valittiin 16 eri parametria, joihin toimittajilta oli pyydetty vastaukset budjettitarjouksen yhteydessä. Jokainen parametri jaettiin viiteen eri luokkaan, joista numero viisi on paras mahdollinen arvosana ja numero yksi huonoin mahdollinen arvosana. Kaikille tarkasteltaville parametreille pystyttiin soveltamaan samaa arvoasteikkoa. Parametrikohittaiset arvoasteikoiden arvot on valittu siten, että ne vastaavat laitteistolle asetettavien vaatimusten skaalaa riittävän laajasti. Arviointiin valitut parametrit voidaan jakaa eri luokkiin mitattavan ominaisuuden mukaan. Parametrit kuvaavat järjestelmän kustannustehokkuutta, suorituskykyä, hankinta- ja toimitusprojektin läpimenoaika, toimittajan toimituskyvykkyyttä, järjestelmän ylläpitokustannuksia, käytettävyyttä sekä integroitavuutta. Parametrikohittaiset arvoasteikot on esitetty taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2 Järjestelmien arvosteluparametrit

Laitekustannus + projektitkustannus, t€	Takaisinmaksuaika, Vuotta	Toimitusaika, kk	Asennusaika, vkoa	Takuuaika, vuotta	Referenssien määrä Suomessa	Referenssien kokonaismäärä	Mittausepävarmuus, mm	Kalibrointiarve lämpötila muutos, °C	Huoltosopimuksen kustannus €/vuosi	Huoltopalvelun vasteaika, tuntia	Mittausohjelman muutos kustannus €/KPL	Uuden nimikkeen lisäys kustannus, €	Kappaleen mitoitettujen piirteiden mittausaika, min.	Järjestelmän käytettävyyys	Järjestelmän integroitavuus	Skaala
≤ 150	≤ 1	≤ 2	≤ 1	> 4	> 9	> 100	≤ 0,01	NAA	NAA	≤ 4	NAA	NAA	≤ 1	5	5	5
> 150 ≤ 300	> 1 ≤ 2	> 2 ≤ 4	> 1 ≤ 2	> 3 ≤ 4	> 6 ≤ 9	> 50 ≤ 100	> 0,01 ≤ 0,1	> 50	≤ 1000	> 4 ≤ 8	≤ 1000	≤ 1000	> 1 ≤ 1,5	4	4	4
> 300 ≤ 450	> 2 ≤ 3	> 4 ≤ 6	> 2 ≤ 3	> 2 ≤ 3	> 3 ≤ 6	> 10 ≤ 50	> 0,1 ≤ 0,25	> 10 ≤ 50	> 1000 ≤ 3000	> 8 ≤ 12	> 1000 ≤ 2000	> 1000 ≤ 2000	> 1,5 ≤ 2	3	3	3
> 450 ≤ 600	> 3 ≤ 4	> 6 ≤ 8	> 3 ≤ 4	> 1 ≤ 2	> 1 ≤ 3	> 5 ≤ 10	> 0,25 ≤ 0,5	> 5 ≤ 10	> 3000 ≤ 6000	> 12 ≤ 24	> 2000 ≤ 3000	> 2000 ≤ 3000	> 2 ≤ 2,5	2	2	2
> 600	> 4	> 8	> 4	≤ 1	≤ 1	≤ 5	> 0,5	≤ 5	> 6000	> 24	> 3000	> 3000	> 3	1	1	1

Investoinnin merkittävyyttä ja kannattavuutta kuvataan järjestelmän hankintakustannuksella ja takaisinmaksuajalla. Hankintakustannuksella kuvataan nimenomaan järjestelmän hankintaan sitoutunutta kokonaispääoman tarvetta. Takaisinmaksulla kuvataan järjestelmän kykyä tuottaa riittävää lisäarvoa yritykselle ja omistajille tunnistettujen taloudellisten raamien sisällä. Toimitusaika ja asennusaika ovat toimitusprojektin mittareita, joilla kuvataan toimittajan reagointikykyä tilauksen jälkeen. Asennusaika on kriittinen parametri siinä mielessä, että normaali tuotantoseisokki kesällä on neljä viikkoa, jonka aikana asennus tulisi suorittaa. Takuuaika mittaa toimittajan kykyä ja halukkuutta vastata toimittamastaan järjestelmästä. Referensseillä pyritään mittamaan toimittajan todistettavaa kykyä toimittaa kyseinen järjestelmä. Mittausepävarmuus kuvaa järjestelmän metrologista kyvykkyyttä mitata 2 000 mm pitkä kappale riittävällä tarkkuudella. Kalibrointilämpötila mittaa järjestelmän lämpötilakalibrointitarvetta eli työvaiheiden tarvetta, jolloin solun toiminta on ajettu alas. Huoltosopimuksen kustannus ja vasteaika mittaavat toimittajan kykyä järjestää kustannustehokas ja vasteajaltaan nopea huolto järjestelmälle. Mittausohjelman muutoskustannus ja uuden nimikkeen lisäyskustannus mittaavat järjestelmän käyttökustannuksia nykyisen nimikkeistön muuttuessa. Järjestelmän käytettävyyys kuvaa solun operaattorille tuotettavan informaation laadukkuutta ja räätälöitävyyden tasoa. Järjestelmän integroitavuus kuvaa tuotettavan mittaustiedon siirrettävyyden, hallinnan ja käytettävyyden tasoa.

3.5.4 Kartoitettujen mittausjärjestelmien suorituskyky

Mittausjärjestelmien tärkein ominaisuus on riittävä suorituskyky eli riittävän pieni mittausepävarmuus pienimpään todennettavaan toleranssiin nähden. Koska valmiit mittausjärjestelmät ovat räätälöityjä kokonaisuuksia, ei järjestelmien mittaustarkkuutta voitu käytännössä todentaa. Mittausjärjestelmien suorituskyvyn osalta luotettiin järjestelmätoimittajien ilmoittamaan suorituskykyyn. Mittausjärjestelmien toimittajille lähetettiin kuitenkin mittaustesteihin toimittajan niin halutessa koekappaleita, joilla he pystyivät ainakin osittain todentamaan mittajärjestelmiensä suorituskyvyn. Pienin mitattavan piirteen toleranssi kappaleissa on $\pm 0,1$ mm, jolloin suurin sallittu mittausepävarmuus on 0,02 mm. Taulukossa 3.3 on esitetty mittausjärjestelmätoimittajien antamat mittausjärjestelmien suorituskykyarvot.

Taulukko 3.3 Mittausjärjestelmien ilmoitettu mittausepävarmuus

Ilmoitettu mittausepävarmuus, mittausalue 2000 mm	
MITTAUSJÄRJESTELMÄ 1.	0,300 mm
MITTAUSJÄRJESTELMÄ 2.	0,500 mm
MITTAUSJÄRJESTELMÄ 3.	0,166 mm

Taulukosta 3.3 voidaan todeta, että yksikään mittausjärjestelmä ei kykene suoriutumaan kappaleiden mittauksesta vaatimuksiin nähden riittävän pienellä mittausepävarmuudella. Mittausjärjestelmällä 1 päästään 10 prosentin mittausepävarmuudella kappaleen toleranssiin $\pm 1,5$ mm, joka on monelta osin linjassa prosessin suorituskyvyn kanssa mutta huomattavasti enemmän kuin tämän hetken vaatimukset. Mittausjärjestelmän mittausepävarmuus 0,5 mm vastaa toleranssia $\pm 2,5$ mm, joka on selvästi jo liian väljä kappaleen vaatimuksiin nähden ja myös prosessin kehittämisen näkökulmasta. Mittausjärjestelmä 3 on ehdottomasti suorituskyykyisin järjestelmä, jonka mittausepävarmuus vastaa toleranssia $\pm 0,8$ mm. Tämäkin arvo on suurempi kuin tämän hetken vaatimus, mutta varmasti riittävä sekä prosessin kehittämisen että kappaleiden laadun varmistamisen kannalta.

3.5.5 Kartoitettujen mittausjärjestelmien kannattavuus

Metrologisen suorituskyvyn ohella yksi merkittävimmistä tekijöistä mittausjärjestelmän hankinnassa on järjestelmän hankinnan kannattavuus. Kaikkien yritystoiminnassa tehtyjen investointien tulisi olla taloudellisesti kannattavia ja tuoda lisäarvoa tuotteiden jalostusprosessiin. Myös mittausjärjestelmän investoinnin tulee olla taloudellisesti kannattava ja tuoda lisäarvoa yrityksen omistajille.

Mittausjärjestelmän takaisinmaksun ja lisäarvon tuoton perusteita kartoitettiin valmistusprosessin potentiaalisista osaprosesseista eli putkenvalmistusprosessista, hitsausprosessista ja linjakokoonpanoprosessista. Putkenvalmistusprosessissa potentiaalinen säästökohde on solun operaattorin tekemä laaduntarkkailutyö, jota tehdään sovittamalla valmiita kappaleita tarkistustulkkiin. Työ vie huomattavan osan operaattorin työajasta, mutta koska operaattorille ei ole osoittaa vastaavalle ajanjaksolle toista lisäarvoa tuottavaa työtä ja solu vaatii operaattorin jatkuvan paikallaolon, ei kyseistä työkustannusta voida laskea säästöihin. Hitsausprosessissa robottihitsauksen jälkeen tehtävät tarkastukset, korjaukset, siirrot ja käännöt ovat kokonaisuutena potentiaalinen säästökohde. Tällä hetkellä korjaustyötä tehdään vuodessa viiden henkilötyövuoden edestä, eli vuosikustannus on 280 000 euroa. Työ koostuu pääasiassa huonosti onnistuneiden robottihitsattujen hitsausseamojen korjauksesta ohjaamorungossa. Hitsattu ohjaamorunko koostuu pääasiassa syvävedettyistä ja laserrajatuista ohutlevyosista sekä taivutetuista profiiliputkista. Syvävedettyjen levyosien vaihtelu on kokemuseräisesti hyvin pientä, ja osat ovat tasalaatuisia. Omavalmisteprofiiliputkien vaihtelu on todistetusti kuitenkin levyosia suurempaa, mikä aiheuttaa

robottihitsauksessa epäkurantteja hitsaussaumoja etenkin profiilien risteyskohdissa ja taivutusten alueilla olevien sovitteiden kohdissa. Koska ongelmaa voidaan tuskin poistaa kokonaan, päädyttiin korjaushitsauksen osalta maltilliseen säästötavoitteeseen 50 prosenttia tehdystä korjaustyöstä, mikä tarkoittaa 140 000 euroa vuodessa. Tämä tavoite on saavutettavissa profiiliputkien valmistusprosessin tasalaatuisten tuotteiden avulla. Korjaushitsauksesta vapautuville henkilöille on tarjota myös vaihtoehtoisia työtehtäviä, joten säästö on perusteltavissa ja sitä voidaan käyttää laskelmissa. Linjakokoonpanoprosessissa etsittiin säästöpotentiaalia rungon putkiin tehtyjen virhekirjausten avulla, mutta koska tehtyjä kirjauksia ei usean kuukauden tarkastelujaksolla ollut kuin yksittäisiä, ei säästöpotentiaalia voida laskea tältä osa-alueelta. Kokonaissäästöpotentiaaliksi muodostui siten 140 000 euroa vuodessa.

Investointien kannattavuuden analysointiin käytetään kohdeyrityksessä nykyarvomenetelmää. Yrityksen sisäinen korkokanta on 10 prosenttia. Putkien valmistussolu on ollut käytössä vuodesta 2010 lähtien, ja oletettu laskennallinen käyttöikä järjestelmällä on 15 vuotta. Koska mittauslaitteiston mahdollinen käyttöönotto on aikaisintaan vuoden 2019 aikana, voidaan mittausjärjestelmälle laskea tuotto-odotuksia kuusi vuotta. Vuosituotot eivät tule oletettavasti toteutumaan ensimmäisen käyttöönottovuoden aikana, joten ensimmäisen vuoden säästötavoitteeksi voidaan asettaa puolet vuositavoitteesta eli 70 000 euroa. Jäännösarvoa mittausjärjestelmälle ei lasketa. Koska mittausjärjestelmätoimittajilta on pyydetty kokonaistoimitus, jossa rajapintana toimii solun ohjausjärjestelmä, ei laitteiston lisäksi investointitarvetta tulisi olla muuta kuin mittausjärjestelmän ja solun ohjauksen ohjelmallinen yhteensovittaminen. Ohjelmallisiin muutoksiin ja määrittämättömien projektikulujen kattamiseksi on investointilaskelmiin syytä sisällyttää 50 000 euron lisäkulu. Lisäksi vuotuisiin käyttökuluihin lisätään huoltopalvelun kulu, joka on toimittajan antama kustannus. Huoltokulu vähentää vuotuista nettotuottoa. Näiden tietojen avulla voidaan laskea mittajärjestelmäkohtainen investointiehdotuksen kannattavuus nykyarvomenetelmällä taulukon 3.4 mukaisesti.

Taulukko 3.4 Investointiehdotusten kannattavuus

	MITTAUSJÄRJESTELMÄ 1.	MITTAUSJÄRJESTELMÄ 2.	MITTAUSJÄRJESTELMÄ 3.
	LASKENTAPARAMETRIT	LASKENTAPARAMETRIT	LASKENTAPARAMETRIT
Laskentakorkokanta	10 %	10 %	10 %
Investointiaika (vuotta)	6	6	6
	KUSTANNUKSET JA TUOTOT	KUSTANNUKSET JA TUOTOT	KUSTANNUKSET JA TUOTOT
Hankintakustannukset (neg.)	- 459 261 €	- 393 580 €	- 800 000 €
1. vuoden nettotuotto	70 000 €	70 000 €	70 000 €
2. vuoden nettotuotto	132 005 €	138 000 €	131 500 €
3. vuoden nettotuotto	132 005 €	138 000 €	131 500 €
4. vuoden nettotuotto	132 005 €	138 000 €	131 500 €
5. vuoden nettotuotto	132 005 €	138 000 €	131 500 €
6. vuoden nettotuotto	132 005 €	138 000 €	131 500 €
7. vuoden nettotuotto	- €	- €	- €
8. vuoden nettotuotto	- €	- €	- €
9. vuoden nettotuotto	- €	- €	- €
10. vuoden nettotuotto	- €	- €	- €
Jäännösarvo	- €	- €	- €
	KANNATTAVUUS	KANNATTAVUUS	KANNATTAVUUS
Tuottojen nykyarvo	518 548 €	539 208 €	516 808 €
Kustannusten nykyarvo	- 459 261 €	- 393 580 €	- 800 000 €
Nykyarvo	✓ 59 287 €	✓ 145 628 €	✗ 283 192 €
Sisäinen korkokanta	✓ 14,0 %	✓ 20,8 %	✗ -2,5 %
Takaisinmaksuaika	3,8	3,1	6,6

Taulukon 3.4 tuloksista voidaan todeta, että ainoastaan mittausjärjestelmä 1 ja 2 täyttävät järjestelmälle asetettavat taloudelliset vaatimukset, eli nykyarvo on positiivinen ja sisäinen korkokanta yli 10 prosenttia. Mittausjärjestelmä 3 ei ole taloudellisesti perusteltavissa.

3.5.6 Kartoitettujen mittausjärjestelmien vertailu AHP-menetelmällä

Mittausjärjestelmien keskinäiseen vertailuun käytettiin AHP-menetelmää. Vertailussa tarkasteltiin taulukossa 3.2 esiteltyjä 16:tta eri parametria, joihin toimittajilta oli pyydetty vastaukset budjettitarjouksen yhteydessä. Parametrikohittaisen arvoasteikon laadinnan jälkeen muodostettiin parivertailutaulukko, jossa kaikkia parametreja verrataan toisiinsa. Jokainen parametri siis arvotetaan toisiin nähden tässä tapauksessa viisiportaisella asteikolla. Parivertailutaulukosta muodostetaan matriisi, jonka elementeille eli parametreille määritetään normalisoidut painoarvot käyttämällä ominaisvektorimenetelmää. Parivertailutaulukko on esitetty liitteessä D.

Parametrikohittaisia painoarvoja voitiin nyt soveltaa ensimmäisessä taulukossa, jossa jokaiselle mittausjärjestelmälle on määritelty parametrikohittainen pisteytys. Painoarvojen avulla pisteytys saadaan tehtyä siten, että asiakkaan näkökulmasta tärkeimmät laitteiston ominaisuudet – tässä tapauksessa mittausjärjestelmän suorituskyky ja kustannus – saavat suurimman painoarvon. Parametrikohittaiset painoarvot käyvät esille taulukosta 3.5 ja liitteestä D.

Taulukko 3.5 Vertailuparametrien painoarvot

Laitekustannus + projektikustannus, €	Takaismaksuaika, Vuotta	Toimitusaika, kk	Asennusaika, vkoa	Takuuaika, vuotta	Referenssien määrä Suomessa	Referenssien kokonaismäärä	Mittausepävarmuus, mm	Kalibrointitarve lämpötila muutos, °C	Huoltosopimuksen kustannus €/vuosi	Huoltopalvelun vasteaika, tuntia	Mittausohjelman muutos kustannus €/KPL	Uuden nimikkeen lisäys kustannus, €	Kappaleen mitoitettujen piirteiden mitausaika, min.	Järjestelmän käytettävyyttä	Järjestelmän integroitavuus	Skaala
≤ 150	≤ 1	≤ 2	≤ 1	> 4	> 9	> 100	≤ 0,01	NAA	NAA	≤ 4	NAA	NAA	≤ 1	5	5	5
> 150 ≤ 300	> 1 ≤ 2	> 2 ≤ 4	> 1 ≤ 2	> 3 ≤ 4	> 6 ≤ 9	> 50 ≤ 100	> 0,01 ≤ 0,1	> 50	≤ 1000	> 4 ≤ 8	≤ 1000	≤ 1000	> 1 ≤ 1,5	4	4	4
> 300 ≤ 450	> 2 ≤ 3	> 4 ≤ 6	> 2 ≤ 3	> 2 ≤ 3	> 3 ≤ 6	> 10 ≤ 50	> 0,1 ≤ 0,25	> 10 ≤ 50	> 1000 ≤ 3000	> 8 ≤ 12	> 1000 ≤ 2000	> 1000 ≤ 2000	> 1,5 ≤ 2	3	3	3
> 450 ≤ 600	> 3 ≤ 4	> 6 ≤ 8	> 3 ≤ 4	> 1 ≤ 2	> 1 ≤ 3	> 5 ≤ 10	> 0,25 ≤ 0,5	> 5 ≤ 10	> 3000 ≤ 6000	> 12 ≤ 24	> 2000 ≤ 3000	> 2000 ≤ 3000	> 2 ≤ 2,5	2	2	2
> 600	> 4	> 8	> 4	≤ 1	≤ 1	≤ 5	> 0,5	≤ 5	> 6000	> 24	> 3000	> 3000	> 3	1	1	1
12 %	12 %	7 %	6 %	6 %	4 %	4 %	12 %	5 %	3 %	5 %	4 %	4 %	5 %	6 %	5 %	
PAINOARVO																

Koska parivertailun on oltava yhdenmukainen, laskettiin tulokselle yhdenmukaisuusindeksi ja konsistenssisuhde. Matriisin koon mukaan ($n = 16$) satunnaisindeksiksi muodostui 1,57 ja konsistenssisuhteeksi 0,094. Koska raja-arvona pidetään arvoa 0,100, on vertailun tulos hyväksyttävällä tasolla.

AHP-vertailun lopputuloksena saatiin järjestelmäkohtainen pisteytys asteikolla nollasta viiteen pistettä. Pisteytys käy ilmi taulukosta 3.6 ja liitteestä D. Parhaimman tuloksen

vertailussa sai mittausjärjestelmä 2 lukemalla 3,00 pistettä. Toiselle sijalle tuli mittausjärjestelmä 1, joka sai 2,91 pistettä. Kolmanneksi vertailussa jäi mittausjärjestelmä 3 pistein 2,86. Järjestelmien välinen paremmuusjärjestys on selvästi havaittavissa, vaikka niiden välinen piste-ero jäikin odotettua pienemmäksi. Tulos kertoo osaltaan järjestelmien erilaisista vahvuusalueista, joiden avulla ne pärjäsivät vertailussa.

Taulukko 3.6

Mittausjärjestelmien vertailun loppupisteet

	Toimittajakohtainen pistemäärä asteikolla 0-5
MITTAUSJÄRJESTELMÄ 1.	2,91
MITTAUSJÄRJESTELMÄ 2.	3,00
MITTAUSJÄRJESTELMÄ 3.	2,86

4 LOPPUPÄÄTELMÄT

4.1 Tulosten arviointi

Työn kokeellisessa osuudessa saatiin tuloksia nykyisen mittausmenetelmän suorituskyvystä sekä putkentaivutuksen osavalmistusprosessien laaduntuotto- ja suorituskyvystä. Lisäksi mittausjärjestelmäkartoituksessa selvitettiin järjestelmien suorituskyy- ja kannattavuusarvot. Järjestelmien välisen vertailun lopputuloksena saatiin järjestelmäkohtaiset kokonaisarvosanat sekä paremmuusjärjestys.

4.1.1 Käytössä olevan mittausmenetelmän mittausepävarmuus

Käytössä oleva mittausmenetelmä todettiin suorituskyvyltään riittämättömäksi valitun kappaleen mittaamiseen kaikilla tarkasteltavilla mitoilla taulukon 3.1 mukaisesti. Tilastollisen laadunvalvonnan kannalta on ensisijaisen tärkeää, että mittausmenetelmä on luotettava. Silloin laadunvalvonnan havainnoilla on tukeva pohja ja niiden perusteella tehdyt korjaustoimenpiteet ovat oikeansuuntaisia ja -laatuisia. Mittauksien aikana huomattiin käytetyn mittausmenetelmän tuomat haasteet monimuotoisten kappaleiden mittauksessa. Kun kappale sisältää laajoja kaaria ja epätasaisia pintoja, pallomaisella mittakärjellä mittaaminen on epätarkka menetelmä. Mikäli kappaleen mittaa kaarevalta pinnalta hieman eri kohdasta eri mittauskerroilla tai mittaajana toimii eri henkilö, vaikuttaa se suoraan saatuihin tuloksiin. Sekä toistettavuuden että uusittavuuden osalta on mitattavan kappaleen kiinnittäminen mittausohjelman käyttämään 3D-malliin kriittinen vaihe, joka tulee tehdä hyvin huolellisesti. Pienikin virhe mallin kiinnittämisessä aiheuttaa suuria virheitä etenkin kappaleen äärilaidoissa.

Nykyinen mittausmenetelmä sisältää useita eri muuttujia. Mittaustapahtumaa tuleekin standardoida, ohjeistaa ja harjoitella siten, että tavoiteltu mittausepävarmuuden taso saavutetaan, tai vaihtoehtoisesti menetelmää täytyy muuttaa, jos korjaustoimenpiteet eivät ole riittäviä. Korjaustoimenpiteiden jälkeen menetelmää täytyy uudelleen testata, ja mikäli taso on kohteeseen riittävä, tulee se myös jatkossa säilyttää. Menetelmän parantamiseen voidaan hyödyntää esimerkiksi PDCA-sykliä. Menetelmän kehityksestä huolimatta on myös huomioitava, että kyseinen mittaustapa ei tue nykymuodossaan riittävästi tilastollista reaaliaikaista prosessinohjausta.

4.1.2 Valmistusprosessin osaprosessien tilastollinen prosessin-ohjaus

Tilastollisen prosessinohjauksen tuloksista käy selvästi ilmi, että putkien valmistusprosessin osaprosessit eivät ole hallinnassa. Kaikissa osaprosesseissa etenkin valmistuserien välinen vaihtelu mutta osittain myös erien sisäinen vaihtelu on suurta. Tuloksia analysoitaessa on kuitenkin huomattava myös mittausmenetelmän suuri vaihtelu. Koska kappaleet ovat kuitenkin päivittäisessä käytössä, on perusteltua kyseenalaistaa myös kappaleille laadittu valmistusspesifikaatio.

Kappaleen pituuden eli mitta 1:n osalta valmistusprosessi on selvästi sivussa nominaalimitasta ja annetusta toleranssista. Koska kappaleet kuitenkin toimivat käytännössä, on oletettavaa, että nominaalia pidempi kappale sopii käyttökohteeseensa ja nominaalimitasta on mahdollisesti korjattava vastaamaan todellista valmistuspituutta. Tähän seikkaan vaikuttavat oleellisesti mitatun kappaleen vastinkappaleet, jotka oletettavasti eivät ole teoreettisen mallin mukaisia vaan vaativat pidemmän kappaleen rakojen välttämiseksi. Tuloksista käyvät esille selvästi valmistuserien vaihdot. Operaattorikohtainen tulosten jakauma ei ollut normaalijakautunutta, ja valmistuserien välinen vaihtelu on suurta. Jakaumien muodostumiseen vaikuttaa monia eri seikkoja, kuten materiaali, lämpötila, laitteiston kuluminen sekä ryömintä, mutta operaattori on kuitenkin vastuullinen prosessin tasalaatuisuudesta ja kyvystä tuottaa vaatimusten mukaisia kappaleita. Operaattorien toimintatavat vaativatkin siis yhtenäistämistä, ja ohjauksessa täytyy painottaa vaatimusten mukaisten tuotteiden valmistamista, jonka mukaan prosessia tulee ohjata. Sahausprosessin saattaminen vakaaksi valmistusprosessiksi vaatii prosessinohjaustyötä, jossa operaattorien koulutus on ensisijaisen tärkeää. Tärkeää on myös huomioida materiaalien ja lämpötilan vaikutukset prosessin ohjauksessa.

Myös kappaleen taivutuksen eli mitta 2:n valmistusprosessi on sivussa annetusta nominaalimitasta ja toleranssista. Sivussa olemiseen vaikuttaa luonnollisesti useita seikkoja, joista yksi on profiilin muodonmuutos eli litistymisen taivutuksen harjalta. Muodonmuutos on asia, jota ei oteta huomioon kappaleen mallinnuksessa, ja se vaikuttaa oleellisesti kyseiseen mittaan. Merkittävä seikka on kuitenkin myös kappaleiden vajavainen laadunvarmistus, koska tarkastustulkit eivät ota kantaa kyseiseen mittaan tarkasti ja mittojen toteutumista ei seurata säännöllisellä näyte-eräkäytännöllä, jossa mitat todennettaisiin sovitun prosessin mukaisesti. Tulosten mukaan myös operaattorien ohjeistukseen ja koulutukseen tulee kiinnittää huomiota, jotta prosessin ohjaamisen periaatteet ovat yhteneviä eri tilanteissa ja operaattorikohtainen vaihtelu saadaan poistettua. Myös materiaalien vaihtumisella huomattiin olevan vaikutusta taivutuksen onnistumiseen. Materiaalien vaihtumisen yhteydessä operaattorin on kiinnitettävä erityistä huomioita prosessin ohjaukseen. Lämpötilan vaikutus taivutusprosessiin on marginaalinen, eikä lämpötilan muutos ole tärkeä parametri taivutusprosessin ohjaamisessa.

Mitta 5:n eli kappaleen Z-akselin suuntaisen koneistuksen osalta tulokset ovat sivussa annetusta nominaalista ja toleranssista. Merkittävä seikka mitan toteutumisessa on profiilin muodonmuutos taivutuksen aikana, minkä vuoksi putkiprofiili ei vastaa enää teoreettista malliaan ja aiheuttaa systemaattista mittavirhettä tason ja reiän välille. Myös kappaleiden paikoittuminen koneistuksen kiinnitykseen on kriittinen vaihe, koska reikämatriisien paikka suhteessa putken geometriaan määräytyy kappaleen paikoituksen perusteella. Robotti ei kalibroi kappaleen sijaintia enää ennen koneistusta. Huomionarvoinen seikka on myös kappaleiden vajavainen laadunvarmistus reikien osalta. Tarkastustulkit eivät ota kantaa reikien paikkoihin, eikä mittojen toteutumista seurata säännöllisellä näyte-eräkäytännöllä, jossa mitat todennettaisiin sovitun prosessin mukaisesti. Tulosten perusteella myös operaattorien toiminnassa koneistuksen ohjauksen osalta on kehitettävää. Operaattorien toimintamallien yhtenäistäminen pienentäisi operaattorikohtaisten jakaumien eroja ja parantaisi lopputulosta. Tulosten mukaan myös koneistuksen lämpötilavaihteluun ja materiaalierän vaihtumiseen tulee kiinnittää huomiota. Lämpötilan vaikutus reikien paikoitukseen tulee oletettavasti robotin toiminnan kautta, joka muuttuu lämpötilan muuttuessa. Robotin toimintaa ei pysty juurikaan muuttamaan, mutta operaattori voi kuitenkin säätää prosessia havaitun muutoksen mukaan. Materiaalin vaikutuksen kytkeytymismekanismi reikien paikoitukseen ei ole yksiselitteinen ja vaatii lisätutkimusta. Joka tapauksessa operaattorin tulee kiinnittää huomiota reikien paikoitukseen materiaalierän vaihtuessa.

Myös mitta 6:n eli kappaleen Y-akselin suuntaisen koneistuksen osalta tulokset ovat sivussa annetusta nominaalista ja toleranssista. Kokonaisuutena valmistuserä on kuitenkin osoitus prosessin kyvystä toimia hallitusti, kun erityisyyttä ei ole vaikuttamassa toimintaan. Hyväksi havaitut toimintamallit tulisikin monistaa yleisiksi toimintatavoiksi. Myös operaattorikohtaiset normaalijakaumat kertovat muita osaprosesseja paremmin hallinnassa olevasta prosessista, mitä myös I- ja MR-kaavio puoltavat (kuva 3.22). Tulosten mukaan valmistuslämpötilan ja materiaalierän muutoksilla on korrelaatio koneistusmittojen toteutumiseen, mutta se on pieni.

Kokonaisuutena valmistusprosessien kyvykkyys tuottaa vaatimusten mukaisia tuotteita, ei ole riittävällä tasolla. Osaprosesseihin vaikuttaa useita eri tekijöitä, jotka vaativat operaattoreilta valvontaa ja prosessinohjausta. Operaattoreiden koulutukseen ja ohjeistukseen tulee panostaa, jotta operaattorikohtaiset vaihtelut saataisiin mahdollisimman pieniksi ja toiminta standardoitua. Erityisesti merkille pantavaa on valmistuserien lähtötasojen suuri vaihtelu operaattorikohtaisesti. Lämpötilan ja materiaalierän vaihtelulla havaittiin olevan vaikutusta saatuihin tuloksiin, ja nämä parametrit tuleekin huomioida entistä tarkemmin prosessin valvonnassa. Jotta operaattoreilla olisi tehokkaat työkalut ohjata prosessia vaatimuksiin nähden riittävällä tarkkuudella ja reaaliaikaisesti, olisi valmistusprosessin prosessinaikainen kappaleiden mittausjärjestelmä erinomainen investointi.

4.1.3 Valmistusprosessin osaprosessien suorituskyyky

Prosessin maksimisuorituskyyky ja suorituskyykyluku voidaan laskea vain prosesseille, jotka ovat hallinnassa ja joiden tulokset muodostavat normaalijakauman. Saatujen tulosten mukaan mikään osaprosessi ei täyttänyt annettuja ehtoja. Koska prosessin suorituskyykyyn liittyvät mittaukset tehtiin samanaikaisesti muiden mittausten kanssa ja tulokset olivat olemassa, päätettiin suorituskyykyarvot kuitenkin selvittää.

Mittojen 1, 4 ja 5 osalta tulosten jakauma oli annettuun toleranssiin nähden riittävän suppea tai lähellä annettuja raja-arvoja. Ongelma oli kuitenkin kaikkien näiden osaprosessien osalta se, että jakauma oli selvästi sivussa toleranssialueesta. Kaikkien osaprosessien jakauma tulisikin ohjata toleranssirajojen sisälle. Jos jakauman siirtäminen ei ole tuoteteknisesti mahdollista, täytyy kappaleen vaatimuksia muuttaa vastaamaan jakauman todellista sijaintia. Tulosten perusteella osaprosesseissa on kuitenkin potentiaalia suorituskyykyisiksi prosesseiksi. Mitan 6 jakauma on huomattavasti leveämpi kuin toleranssin vaihteluväli sallii. Vaatimustaso toleranssin suhteen onkin todella kova, ja on epätodennäköistä, että prosessi pystyy kehittymään riittävän hyvälle tasolle. Mitan 6 toleranssin vaatimustasoa tulisikin tarkastella uudelleen. Jakauman sijainti tulee ohjata toleranssialueen keskelle, tai mikäli se ei ole toiminnallisesti mahdollista, tuotevaatimuksia tulee muuttaa.

Vaikka suorituskyyvyn tulokset ovatkin vain suuntaa-antavia, voidaan niiden pohjalta todeta, että pääsääntöisesti osaprosesseissa on potentiaalia kehittyä suorituskyykyisiksi prosesseiksi. Suorituskyykyvaatimukseen pääseminen vaatii kuitenkin aktiivista ja pitkäjänteistä ohjaus- ja kehitystoimintaa. Kaikilta osin osaprosesseille asetetut suorituskyykyvaatimukset eivät vaikuta realistisilta, ja näiltä osin suorituskyykyvaatimuksia tulisikin tarkastella uudelleen. Mikäli vaatimuksia ei voida muuttaa, on hyvin todennäköistä, että kappaleiden valmistamiseksi täytyy kartoittaa vaihtoehtoinen valmistusmenetelmä.

4.1.4 Prosessinaikaisten mittausjärjestelmien kartoitus

Prosessinaikaisten mittalaitteiden kartoituksessa oli alkuvaiheessa mukana viisi järjestelmää, mutta lopullinen vertailu tehtiin lopulta kolmen mittausjärjestelmän välillä. Kartoituksessa saatujen mittausepävarmuustulosten perusteella on kyseenalaista, ovatko valmistettavilta kappaleilta vaaditut mittaustarkkuudet tarpeellisia. Onko kappaleen määrittely liian tiukka, koska myöskään SPC-mittauksissa analysoidut prosessimittarit eivät tue pyydettyä tarkkuutta? Kappaleen suunnittelulaatu ei vastaa prosessin ja mittausmenetelmien kyyvykkyyttä valmistaa kyseisiä kappaleita.

Mittausjärjestelmien mittausepävarmuuden osalta päädyttiin lopputulokseen, jossa mikään mittausjärjestelmä ei saavuttanut asetettuja tavoitteita, mutta mittausjärjestelmän 2 suorituskyyky oli merkittävän heikko. Mittausjärjestelmien 1 ja 3 osalta suorituskyyky on prosessin valvonnan kannalta mahdollisesti riittävä, mutta se vaatii muutoksia valmistet-

tavien kappaleiden tolerointeihin. Kannattavuuden osalta mittausjärjestelmät 1 ja 2 täyttävät järjestelmälle asetettavat taloudelliset vaatimukset: nykyarvo on positiivinen ja sisäinen korkokanta yli 10 prosenttia. Mittausjärjestelmä 3 ei ole taloudellisesti perusteltavissa. AHP-vertailun perusteella taas mittausjärjestelmä 2 on kokonaisuutena paras vaihtoehto kyseiseen mittaustehtävään. Vaikka AHP-menetelmä otti kantaa järjestelmien kannattavuuteen ja mittauksen suorituskykyyn, ei menetelmä kuitenkaan huomioi selviä raja-arvojen ylityksiä tärkeiden parametrien osalta. Mittausjärjestelmän 2 suorituskyky ei ole sovellukseen riittävä.

Yhteenvedona kartoituksesta voidaan todeta, että AHP-vertailun, mittauksen suorituskyvyn ja kannattavuuden perusteella mittausjärjestelmä 1 on suorituskykyisin vaihtoehto nykyisten valmistettavien kappaleiden prosessinaikaiseen mittaukseen. Yhteydet kaikkiin järjestelmätoimittajiin on tietysti syytä pitää edelleen auki ja tarjota kaikille mahdollisuus vielä tietojen tarkistamiseen ja päivittämiseen. Vertailusta saatujen tietojen pohjalta suurin panos kannattaa kuitenkin suunnata järjestelmään 1. Mikäli kappaleiden tolerointeja ei kuitenkaan saada järjestelmien mittausepävarmuuden kannalta riittävälle tasolle tai mittausepävarmuutta vähennettyä, on selvitettävä vaihtoehtoisia prosessinaikaisia mittausmenetelmiä.

4.1.5 Työssä saatujen tulosten luotettavuus

Nykyisen mittausjärjestelmän Gage R&R -menetelmällä saadut mittausepävarmuuden tulokset on tuotettu vaaditun prosessin mukaisella menettelyllä, joka on myös tarvittaessa toistettavissa. Mittausepävarmuuden suuruus oli jossain määrin yllätys, mutta toisaalta mitatun kappaleen haastavuus oli tiedossa, joten täysin odottamattomia tulokset eivät olleet. Mittausepävarmuuden todentaminen sisältää useita mittauksia, jotka tehtiin valvotusti ja ohjatusti, joten saatuja mittausepävarmuuden tuloksia voi pitää luotettavana.

Valmistusprosessin osaprosessien tilastollinen seuranta ja analysointi sekä osaprosessien suorituskyvyn analysointi perustuvat suurelta osin mittausmenetelmään, joka ei ole ollut epävarmuuden osalta luotettava. Tulokset ovat kuitenkin suuntaa-antavia, ja mittausmenetelmän epävarmuuden osuutta vähentää se seikka, että kaikki mittaukset on tehty yhden mittajaan toimesta. Lisäksi kaikki mittaukset on tehty samoilla mittaustyökaluilla ja apuvälineillä sekä hyvin pitkälti vakioituissa olosuhteissa.

Prosessinaikaisten mittausjärjestelmien suorituskyky ja kustannustiedot sekä AHP-vertailun tiedot perustuvat toimittajien itse antamiin arvoihin. Annettujen arvojen todentaminen ei ole kaikilta osin mahdollista muuten kuin investointiprojektin kautta, joten tältä osin on luotettava toimittajien ammattitaitoon. AHP-vertailu perustuu tutkittuun menetelmään, joka toteutettiin ohjeistuksen mukaisesti. AHP-vertailun tuloksia voi pitää luotettavana siltä osin, kuin toimittajilta saatu tieto on luotettavaa.

4.1.6 Työssä saatujen tulosten yleistettävyyys

Nykyisen mittausmenetelmän mittausepävarmuuden tulokset esimerkkikappaleelle voidaan yleistää koskemaan yrityksen sisällä tapahtuvien putkigeometrioiden mittausta, sekä myös muita geometrialtaan haastavien kappaleiden mittausta. Tasossa tapahtuvia tai tasopinnoista muodostuvien kolmiulotteisten kappaleiden mittauksia mittausepävarmuus ei kata. Valmistusprosessin osaprosessien seurannan tulokset ja osaprosessien suorituskykymittaukset ovat vain kyseisille prosesseille valideja tuloksia. Muihin vastaaviin osaprosesseihin tuloksia ei voi soveltaa. Prosessinaikaisen mittauksen selvityksestä saadut järjestelmien suorituskykyarvot ovat yleistettävissä kaikkiin sovelluskohteisiin, joihin kyseiset menetelmät soveltuvat. Investointilaskelmien ja AHP-menetelmän tulokset ovat myös osittain sovellettavissa muihin sovelluskohteisiin.

4.2 Jatkotoimenpiteet

4.2.1 Prosessin kehittämisen vaihtoehdot ja toimintatavat

Prosessinaikaisen mittausjärjestelmän hankinta on merkittävä pitkäntähtäimen investointi, jonka tulee osaltaan tukeutua yrityksen strategiaan ja olla erittäin hyvin perusteltu ja valmisteltu. Mikäli investointia ei toteuteta, täytyy myös huomioida tilanne, miten valmistusprosessin osaprosesseja voidaan tehokkaasti valvoa nykyisellä mittausmenetelmällä ja mitä kehitysajatuksia tästä työstä voidaan siirtää käytäntöön.

4.2.2 Valmistusprosessin kehittäminen prosessinaikaisen mittausjärjestelmän investoinnilla

Putkien valmistusprosessin valvonnan ja kehittämisen kannalta prosessinaikaisen mittausjärjestelmän investointi olisi ehdoton parannus, joka mahdollistaisi reaaliaikaisen prosessin valvonnan. Prosessin omistajan ja yrityksen johdon on käytävä keskustelu, onko investoinnista saatava hyöty panos-tuottosuhteeseen nähden riittävä vai voidaanko laadunvarmistustoimintaa kehittää muulla tavoin. Ennen etenemistä myös järjestelmän soveltuvuuden tutkimusta tulee syventää ja varmistaa järjestelmän kokonaisvaltainen soveltuminen käyttötarkoitukseensa. Mikäli yrityksen johto puoltaa investointia, täytyy investointi hyväksyttää myös yrityksen hallituksella.

Mikäli laitteiston hankintapäätös esitettyjen tietojen ja mahdollisten lisätietojen pohjalta päätetään tehdä, tulee investointiprojektille valita projektipäällikkö. Projektipäällikön tehtävä on vastata projektin etenemisestä aikataulun ja laskelmissa esitettyjen kustannusten rajoissa. Mittausjärjestelmän tekninen sovittaminen soluun voidaan tehdä hyvin pitkälti ennalta CAD-suunnittelun avulla, joten näin voidaan huomioida järjestelmän tekninen sopivuus hyvinkin tarkasti. Suurempi avoin kysymys on ohjausrajapintojen yhteen-

sovittaminen nykyisen solun ohjausjärjestelmän ja mittausjärjestelmän välillä. Ohjauksien synkronoinnin pitäisi olla hyvin yksinkertainen tiedonsiirto ohjausjärjestelmien välillä, mutta käytännössä asia vaatii tarkkaa selvitystä. Arvioitu toimitusaika järjestelmälle on 5 kuukautta ja asennusaika 2 viikkoa. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmä on asennettava tehtaan kesäseisokin aikana. Jotta järjestelmä on asennettavissa kesäseisokin aikana, täytyy tilauksen tapahtua viimeistään kyseisen vuoden ensimmäisen kvartaalin alkupuolella. Ennen asennusta ja käyttöönottoa olisi operaattoreille syytä antaa käyttökoulutusta järjestelmästä ja huollolle huoltokoulutusta järjestelmiin liittyviin koneisiin. Järjestelmän käyttöönotto ja datan analysointi vaatii aktiivista otetta, jotta toiminta saadaan mahdollisimman nopeasti normalisoitua ja mittausdatan seuranta sekä prosessin ohjaus käynnistettyä.

4.2.3 Valmistusprosessin kehittäminen ilman mittalaitteinvestointia

Mikäli järjestelmän investointipäätöstä ei tehdä, tulee pohtia keinoja nykyisen mittausjärjestelmän kehittämiseksi. Kuten mittausepävarmuuden määrittämisessä havaittiin, ei nykyinen koskettava mittaaminen sovellu kyseisille kappaleille pintojen suuren vaihtelun vuoksi ja nykyisistä mittaustulkeista saatava laatu palaute on vain suuntaa-antavaa. Kappaleiden tulkkaamista on kuitenkin jatkettava. Lisäksi yrityksessä on käytössä käsivarsimittalaitteeseen kytkettävä viivalasermittauslaite, jonka käytöstä on hyviä kokemuksia. Kappaleiden mittaaminen tietyllä otannalla nykyisellä menetelmällä kyseistä mittalaitetta hyödyntäen voisi tuoda apua prosessin vaihtelun selvittämiseen. SPC-menetelmän avulla prosessista saataisiin pitkän ajan seurantatietoa, vaikka se ei olekaan reaaliaikaista. Kappaleiden käsivarsimittamista varten tarvitaan kuitenkin kappalekohtaiset mittausjigrit tai universaali kiinnitin, jotta kappaleen kiinnittäminen tapahtuu aina samalla tavalla. Mittausprosessi tulee ohjeistaa kappalekohtaisesti hyvin tarkasti, jotta mittaamisprosessin poikkeamat saadaan minimoitua.

Myös valmistussolun operaattoreiden koulutukseen tulee panostaa, jotta toimintatavat saadaan yhtenäistettyä. Valmistuksessa seurattavien parametrien valvontaa tulee myös kehittää. Tunnistettujen vaihtelulähteiden putkiaihioiden valmistuserien, lämpötilan ja operaattoreiden välillä havaittiin korrelaatiota, mutta vaihtelulähteitä on myös muualla prosessissa. Prosessin kehittäminen ilman automaattista seurantaa vaatii pitkälle kehitettyä toimintakulttuuria ja periksiantamatonta työtä vaihtelulähteiden vähentämiseksi.

4.2.4 Valmistettavien kappaleiden suunnittelulaatu

Valmistettavien kappaleiden toleroinnissa havaittiin valmistustekniikkaan nähden liian suuria tarkkuusvaatimuksia. Tulosten perusteella kappaleiden toteutunut mitoitus oli huomattavan sivussa asetetusta nominaalimitoituksesta ja vaihtelu joissain osaprosesseissa huomattavan suurta annettuihin toleransseihin nähden. Kuitenkin kappaleita on pystytty

käyttämään tuotannossa ilman merkittäviä tuotannollisia ongelmia, joten kappaleiden mitoituksessa on ainakin osittain vaadittu ylilaatua. Valmistustekniikalle ei voida asettaa suurempaa tarkkuusvaatimusta kuin mitä sillä pystytään prosessin hajonnan puolesta valmistamaan. Jos vaatimus on hajontaa tiukempi, syntyy prosessissa suunnitelmallisesti hukkaa, joka nostaa kappaleiden valmistuskustannuksia. Kappaleiden suunnittelulaatuun tuleekin kiinnittää huomioita ja korjata dokumentaatio valmistusprosessin mahdollistamalle tasolle.

5 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä on tutkittu kohdeyrityksen ydinvalmistusprosessin osaprosessien ja nykyisen mittausmenetelmän suorituskykyä esimerkkikappaleen valmistamiseen ja laadunvarmistamiseen. Lisäksi työssä on perehdytty prosessinaikaisten mittausjärjestelmien kannattavuuteen ja teknisten ominaisuuksien soveltuvuuteen kyseiseen sovelluskohteeseen.

Työn teoriaosuudessa on tutustuttu valmistusmenetelmien, mittausmenetelmien, tuotelaadun, prosessinohjauksen ja teollisten investointien teoriaan. Teoriapohjaa on sovellettu työn kokeellisessa osuudessa. Kokeellisessa osuudessa valmistettiin valmistusprosessissa prosessianalyysijä varten lukuisia näytteitä, jotka mitattiin käytössä olevalla mittausmenetelmällä. Tähän vaiheeseen kului kalenteriaikaa kuukausia, ja se kuormitti huomattavasti yrityksen mittausresursseja. Kuitenkin työn edetessä tuli esille, että kokeet täytyisi uusida suuren mittausepävarmuuden vuoksi. Mittauksia ei kuitenkaan lähdetty uusimaan aikataulusyistä. Tästä syystä työn kokeellinen osuus on osittain vain suuntaa-antava. Kuitenkin käytössä olevasta mittausmenetelmästä ja valmistusprosessista saatiin paljon uutta tietoa, jonka pohjalta voidaan toimintaa kehittää. Myös prosessinaikaisten mittausjärjestelmien soveltuvuudesta on saatu runsaasti uutta tietoa, ja kuten tuloksista kävi ilmi, investointi on myös taloudellisesti kannattava.

Lähes kaikkien suorituskykymittareiden valossa tuotantoprosessia tulee kehittää, jotta sen lopputuotteet täyttävät tuotteille asetetut vaatimukset. Prosessinaikainen mittausjärjestelmä on oikea tapa kehittää valmistusprosessin osaprosessien suorituskykyä. Reaaliaikainen, yksiselitteinen ja automaattinen ratkaisu tukee valmistusprosessin prosessinvalvontaa ja siten tuotevaihtelun juurisyiden tarkempaa analyysiä. Päätös mittausjärjestelmäinvestoinnin tekemisestä on seuraavassa vaiheessa yrityksen johdolla. Myös tuotteille asetettuihin vaatimuksiin tulee kiinnittää vastaisuudessa enemmän huomiota. Tuotteiden dokumentaation nykyinen vaatimustaso ei kaikilta osin vastaa valmistusprosessin tai laadunvarmistusmenetelmien suorituskykyä, ja siksi tuotteiden valmistukseen tulisiikin vaatimusten mukaan löytää merkittävästi suorituskykyisempiä menetelmiä. Kuitenkin kokeuksen mukaan käytännön vaatimustaso ei ole linjassa dokumentoitujen tuotevaatimusten kanssa, jolloin vaadittu taso tuottaisi ylilaatua ja lisäisi kustannuksia merkittävästi.

Yhdistämällä kaikki havaitut kehityskohteet ja valmistusprosessin prosessinaikainen mittaus yhdeksi kokonaisuudeksi saadaan kohdeyrityksen ydinvalmistusprosessin jatkuvan parantamisen työ käyntiin ja työkalut vaaditulle tasolle. Kehitystyötä tulee ylläpitää, valvoa ja ohjata, jolloin prosessi saadaan hallintaan ja sen suorituskykyä pystytään kehittämään uudelle tasolle. Pitkäjänteisen ja aktiivisen kehitystyön tulokset tulevat esiin osaprosessien pienenevänä prosessinvaihteluna ja valmistusprosessin lopputuotteiden tuotelaadun sekä kannattavuuden parantumisena.

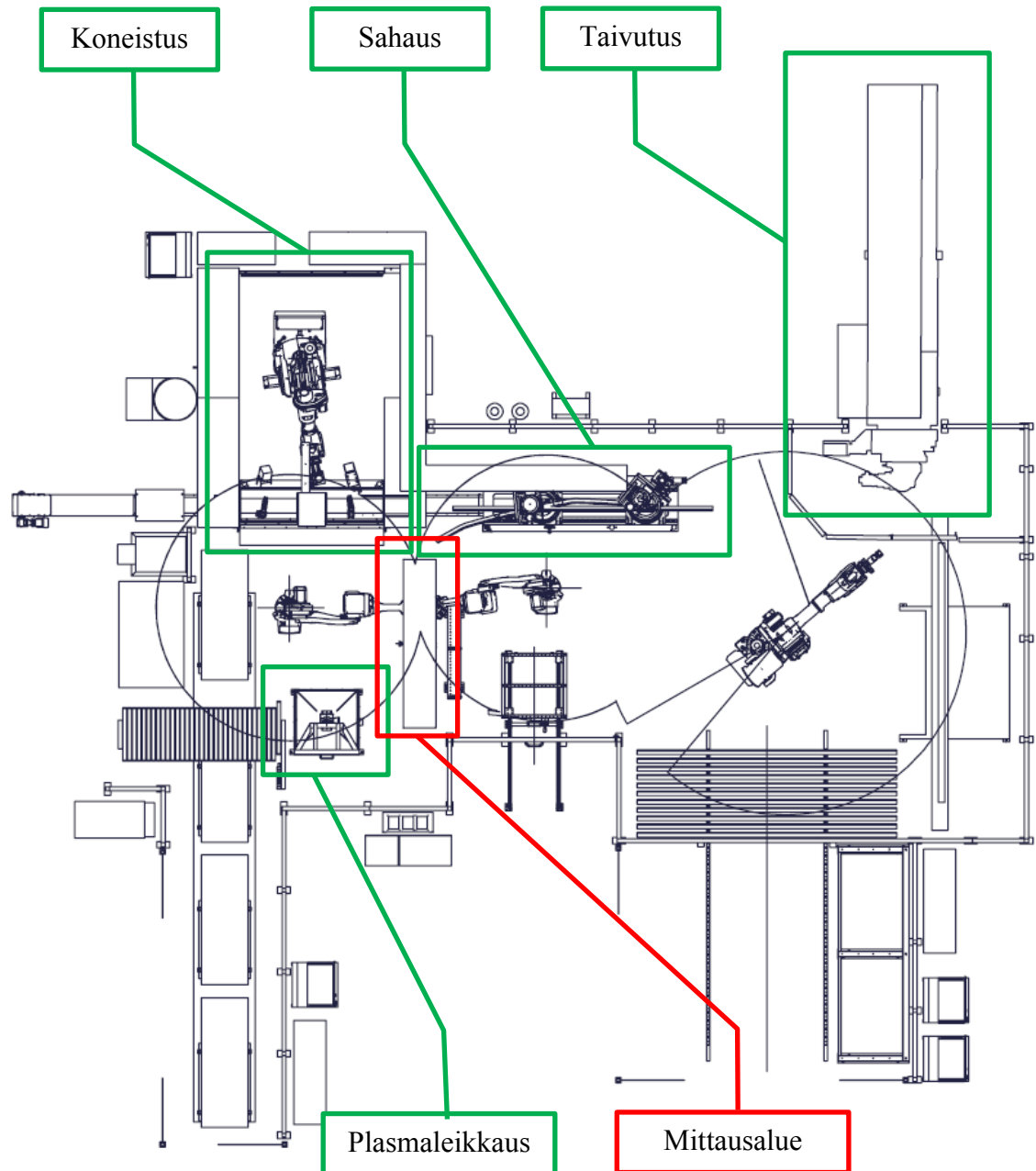
LÄHTEET

- [1] S. Chatti, Optimization of manufacturing accuracy in profile bending, Aachen: Shaker Verlag, 1998.
- [2] L. Laperrière, G. Reinhart, CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Berlin Heidelberg: Springer, 2014, 1318 p.
- [3] B. Alexander, W. Homberg, A. E. Tekkaya, 60 excellent inventions in metal forming. 2015th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2015. 427 p.
- [4] L. Pengfei, W. Liyan, L. Mingzhe, Flexible-bending of profiles and tubes of continuous varying radii, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 88, 2017, 1669-1675 pp.
- [5] J. NEU – Putkenvapaataivutusautomaatit, Vossi Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.10.2017): http://www.vossi.fi/tuotteet/j_neu.html
- [6] E. Ihalainen, K. Aaltonen, M. Aromäki, P. Sihvonen, Valmistustekniikka, Hämeenlinna: Otakustantamo, 1986. 480 s.
- [7] F. Klocke, A. Kuchle, Manufacturing Processes 1: Cutting, 2011, Berlin Heidelberg: Springer, 2011. 517 p.
- [8] L. Jie, J. Shu-Hui, The Study of Design Method for Robotic Drill End Effector, Procedia Engineering, Volume 174, 2017. 206-210 pp.
- [9] M.F. Zaeh, O. Roesch, Improvement of the machining accuracy of milling robots, Production Engineering, vol. 8, no.6. 737-744 pp.
- [10] S. Garniera, K. Subrina, K. Waiyaganb, Modelling of robotic drilling, Procedia CIRP, Volume 58, 2017. 416-421 pp.
- [11] P. Andersson, H. Tikka, Mittaus- ja laatutekniikat, Porvoo: WSOY, 1997, 323 s.
- [12] V.E. Sower, Essentials of quality: with cases and experiential exercises, Hoboken, NJ: Wiley, 2011, 392 p.
- [13] T. Keinänen, M. Järvinen, Mittaustekniikka. Helsinki: Sanoma Pro, 2014. 182 s.
- [14] SFS-OPAS 99, SFS-OPAS 99 : Kansainvälinen metrologian sanasto (VIM). perus - ja yleiskäsitteet sekä niihin liittyvät termit, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2010, 96 s.

- [15] R. Salomäki, Suorituskykyiset Prosessit - Hyödynnä SPC, Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus, 2003. 424 s.
- [16] Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, Quality Systems Requirements QS-9000, Essex: 1998. 142 p.
- [17] SFS, SFS-EN ISO 10012, Mittausten hallintajärjestelmät. Vaatimukset mittausprosesseille ja mittauslaitteistoille, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2003, 46 s.
- [18] SFS-EN ISO 10360-1 + AC, Geometrical Product Specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 1: Vocabulary (ISO 10360-1:2000), Suomen Standardisoimisliitto, 2001, 53 s.
- [19] J. Stjepandić, N. Wognum, Wim J.C. Verhagen, Concurrent Engineering in the 21st Century Foundations, Developments and Challenges, Cham: Springer, 2015. 836 p.
- [20] V. Joala, Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu, Leica Nilomark Oy, 2006. 7 s. Saatavilla: <http://docplayer.fi/7209674-Laserkeilauksen-perusteita-ja-mittauksen-suunnittelu.html>
- [21] G. T. Smith, Machine Tool Metrology, Springer-Verlag, 2016. 685 p.
- [22] Tikka H. Koordinaattimittaus. Tampere: Tampereen Yliopistopaino Oy - Juvenes Print, 2009. 473 s.
- [23] A. Kesseli, 3D-digitointi 8.5.2006. Lahden ammattikorkeakoulu. 38 s. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/11532>
- [24] J.-A. Beraldin, F. Blais, L. Cournoyer, G. Godin, M. Rioux, Active 3D sensing, The Scuola Normale Superiore, Pisa: 2000. 21 p. Saatavissa: <http://www1.cs.columbia.edu/~allen/PHOTOPAPERS/beraldin.pdf>
- [25] J. Beyerer, F.P. León, C. Frese, Machine Vision Automated Visual Inspection: Theory, Practice and Applications, Berlin Heidelberg: Springer, 2016. 802 p.
- [26] T. kaksonen, Strukturoituun valoon perustuva 3D-pinnan mittaus monikamerajärjestelmällä, Aalto-yliopisto, 2014. 48 s.
- [27] K. Ikeuchi, Computer Vision: A Reference Guide, Springer, 2014. 898 p.
- [28] D. Todorovic, How shape from contours affects shape from shading, Vision Research, 103, Elsevier B.V, 2014. 1-10 pp.

- [29] J. Wu, P. L. Rosin, X. Sun, R. R. Martin, Improving Shape from Shading with Interactive Tabu Search, vol. 31, no. 3, New York: Springer, 2016. 450-462 pp.
- [30] S. Y. Elhabian, Hands on Shape from Shading, Technical Report, University of Louisville, 2008. 37 p. Saatavilla: http://www.sci.utah.edu/~shireen/pdfs/tutorials/Elhabian_SFS08.pdf
- [31] J.-J. Orteu, 3-D computer vision in experimental mechanics, Optics and Lasers in Engineering 47, 2009. 282–291 pp. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.11.009>, Google Scholar, Crossref
- [32] E.-M. Didden, T. L. Thorarinsdottir, A. Lenkoski, C. Schnörr, Shape from Texture using Locally Scaled Point Processes, Image Analysis and Stereology 34 (3), 2015. 161-170 pp. Saatavilla: <https://www.ias-iss.org/ojs/IAS/article/view/1078/984>
- [33] P. Soutzinos, Shape from Texture, Verkkoaineisto (viitattu 7.2.2018), Saatavissa: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/AV0506/s0565925.pdf
- [34] E. R. Davies, Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities San Diego: Academic Press, 2012. 912 p.
- [35] P. Vinni, Kuva kertoo enemmän kuin tuhat sanaa, Mitä on fotogrammetria, Verkkoaineisto (viitattu 14.3.2018), Saatavilla: <http://www.kotikone.fi/farryan/Teksteja/JatkokurssiB.htm>
- [36] B. Billiot, F. Cointault, L. Journaux, J.-C. Simon, P. Gouton, 3D Image Acquisition System Based on Shape from Focus Technique, 13, no. 4, Basel, 2013. 5040-5053 pp.
- [37] T. Tuurala, Prosessi, prosessiorganisaatio ja prosessin ohjaus, Laatuakatemia, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2017): <http://www.kotiposti.net/tuurala/prosessit.htm>
- [38] J.S. Oakland, Statistical Process Control, Routledge: Kidlington, 2008. 458 p.
- [39] W.A. Shewhart. Economic control of quality of manufactured product. New York: Van Nostrand Company, 2015. 501 p
- [40] F. Holmes, Managing Expectations: Standard Deviation And Mean Reversion, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.1.2018): <https://www.valuwalk.com/2014/08/standard-deviation-managing-expectations/>

- [41] M. Lähteenmäki, K. Leiviskä, Tilastollinen prosessinohjaus: perusteet ja menetelmät, Raportti B No8, Lokakuu 1998, Oulun Yliopisto, Oulu, 33 s. Saatavissa (viitattu 12.10.2017): <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514275209.pdf>
- [42] A. Perttula, K. Vattulainen, T. Suurhasko, Todennäköisyyslaskenta opintomoneiste, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2012. 76 s. Ei yleisesti saatavilla
- [43] N.V.R. Naidu, K.M. Babu, G. Rajendra. Total quality management. Daryaganj: New Age International, 2006. 265 p.
- [44] Understanding variables control charts: What is an I-MR chart, Minitab17 Support, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.12.2017): <https://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/quality-tools/control-charts/understanding-variables-control-charts/what-is-an-i-mr-chart/>
- [45] A. John, R. Meran, O. Roenpage, C. Staudter, Six Sigma+Lean Toolset: Executing Improvement Projects Successfully, Berlin Heidelberg: Springer, 2008. 319 p.
- [46] M. Haverila, E. Uusi-Rauva, I. Kouri, A. Miettinen, Teollisuustalous, Tampere: Infacs Oy, 2009. 510 s.
- [47] M. Martinsuo, S. Mäkinen, P. Suomala, J. Lyly-Yrjänäinen, Teollisuustalous kehittyvässä liiketoiminnassa, Edita, 2015. 399 s.
- [48] S. Repo, TTA-11010 Teollisuustalouden perusteet luentomateriaali, investointilaskelmat, 2015. 39 s. Ei yleisesti saatavilla
- [49] R. Venkata Rao, Decision Making in the Manufacturing Environment Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods, Volume 2, London: Springer Verlag London Limited, 2013. 296 p.
- [50] H. Villanen, Päätöksenteko ja analyyttinen hierarkiaprosessi, AHP, Prosessitaito, 2013. 6 s. Saatavissa: http://www.prosessitaito.fi/Paatoksen-teko_AHPn_avulla.pdf
- [51] P. Konstantinos, AHP Lesson 1, International Hellenic University, 2010. 5p. Saatavissa: http://rad.ihu.edu.gr/fileadmin/labsfiles/decision_support_systems/lessons/ahp/AHP_Lesson_1.pdf

LIITE A: VALMISTUSSOLUN LAYOUT

LIITE B: GAGE R&R- JA MR-KORTIN LASKENNAN KERTOIMET

Näyte- erä	A ₂	\tilde{A}_2	A ₃	B ₃	B ₄	c ₄	d ₂	d ₂ [*]	D ₃	D ₄	E ₂
2	1,880	1,880	2,659		3,267	0,7979	1,128	1,41		3,268	2,660
3	1,023	1,187	1,954		2,568	0,8862	1,693	1,91		2,574	1,772
4	0,729	0,796	1,628		2,266	0,9213	2,059	2,24		2,282	1,452
5	0,577	0,691	1,427		2,089	0,9400	2,326	2,48		2,114	1,290
6	0,483	0,548	1,287	0,030	1,970	0,9515	2,534	2,67		2,004	1,184
7	0,419	0,508	1,182	0,118	1,882	0,9594	2,704	2,83		1,924	1,109
8	0,373	0,433	1,099	0,185	1,815	0,9650	2,847	2,96		1,864	1,054
9	0,337	0,412	1,032	0,239	1,761	0,9693	2,970	3,08		1,816	1,010
10	0,308	0,362	0,975	0,284	1,716	0,9727	3,078	3,18	0,223	1,777	0,975
11	0,285		0,927	0,321	1,679	0,9754	3,173	3,27	0,256	1,744	
12	0,266		0,886	0,354	1,646	0,9776	3,258	3,35	0,284	1,716	
13	0,249		0,850	0,382	1,618	0,9794	3,336	3,42	0,308	1,692	
14	0,235		0,817	0,406	1,594	0,9810	3,407	3,49	0,329	1,671	
15	0,223		0,789	0,428	1,572	0,9823	3,472	3,55	0,348	1,652	
16	0,212		0,763	0,448	1,552	0,9835	3,532		0,363	1,637	
17	0,203		0,739	0,466	1,534	0,9845	3,588		0,378	1,622	
18	0,194		0,718	0,482	1,518	0,9854	3,640		0,391	1,608	
19	0,187		0,698	0,497	1,503	0,9862	3,689		0,403	1,597	
20	0,180		0,680	0,510	1,490	0,9869	3,735		0,415	1,585	
21	0,173		0,663	0,523	1,477	0,9876	3,778		0,425	1,575	
22	0,167		0,647	0,534	1,466	0,9882	3,819		0,434	1,566	
23	0,162		0,633	0,545	1,455	0,9887	3,858		0,443	1,557	
24	0,157		0,619	0,555	1,455	0,9892	3,895		0,451	1,548	
25	0,153		0,606	0,565	1,435	0,9896	3,931		0,459	1,541	

LIITE C: FARO TITANIUM -NIVELVARSIKOORDINAATTIMIT- TAUSKONEEN KALIBROINTITODISTUS

Calibration Certificate

Part Description: <u>Titanium</u>	Certification Date: <u>2017-08-03</u>	Serial#: <u>N08-02-04-20702</u>
Single Point - (Max-Min)/2 Specification: <u>N08-02 0.051mm (0.002")</u>	Temperature: <u>See attached data</u>	Certificate#: <u>N08020420702-832017-943A</u>
Volumetric (Max Deviation) Specification: <u>N08-02 +/-0.072mm (+/-0.0028")</u>		

Measurement Standards Traceability

Instrument	Asset Number	Calibration Due	SI Traceability
Kinematic Scale Bar - Short	TQ1596	9/23/2017	*SI Traceability: 00a0c600-0020-0099-69d0-007fc98d4112
Kinematic Scale Bar - Long	Asset Number: TQ1592	Calibration Due: 9/23/2017	*SI Traceability: 00a0c600-0020-0099-a861-007fc996a208
Thermometer	Asset Number: 3608	Calibration Due: 4/4/2018	*SI Traceability: T81400 D-K-15070-01-01 2017-04
Calibration Probe	Asset Number: 3625	Calibration Due: 1/29/2018	*SI Traceability: 15-331-01429
Reference Sphere	Asset Number: 3932	Calibration Due: 7/16/2018	*SI Traceability: 16-363-03059

The artifacts above have been calibrated with a device traceable to the International System of Units (SI) through a National Metrological Institute (NMI) or through an ISO17025 Accredited Laboratory. Calibration was performed following procedures listed on GYMA0015. This procedure was developed in accordance with ASME B99.4-22-2004. See attached data for measurement results.

Calibration Results*

3 Single Point Articulation Tests at <=20%, 20%-80% and >=80% range.	PASSED
1 Effective diameter sphere test.	PASSED
20 Volumetric ball bar tests in 4 quadrants and 2 orientations.	PASSED

Instrument condition as received:

Within specification

Instrument condition outgoing:

Within specifications

This certificate invalidates all other certificates generated before: 8/3/2017 9:43:22 AM
This certificate shall not be reproduced, copied or in full, without permission of FARO Technologies, Inc.
The results of this certificate relate only to the items calibrated or tested.

FARO Technologies, Inc.
PH1: +800-3276378
PH2: +49 (715) 097970
FAX: +49 (715) 0979744

Approved By: Matias Ritterbach Cal Cert Technician
Date: 2017-08-03

Untersiesenstrasse 11/2
D-70825 Körtal-Münchingen
Germany

**LABORATORY
ACCREDITATION
BUREAU
ACCREDITED**

Cert # L-1147.04-1 Calibration

Revised: November 21, 2013

